

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Jakub Drábek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘENÍ PARAMETRŮ POLARIZOVANÉHO SVĚTLA NA VÝSTUPU OPTOVLÁKNOVÉHO SENZORU

MEASUREMENT OF POLARIZED LIGHTPARAMETRS MEASUREMENT ON THE OPTICAL-FIBER SENSOR
OUTPUT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Drábek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jakub Drábek

ID: 164592

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu měření optického výkonu s důrazem na známé metody měření výkonu polarizovaného světla šířícího se optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Práce se zabývá možnostmi měření optického výkonu pro každou rovinu šíření zvlášť. Současné měření okamžitého stavu polarizace a velmi přesné měření vlnové délky umožní získat potřebné informace o nelineárních jevech probíhajících v optickém vlákně. Součástí práce je návrh měřicího pracoviště a jeho realizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[3] COLLETT, E. Polarized Light in fiber optics, SPIE, New Jersey 2003, ISBN: 9780819457615

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou měření optického výkonu s využitím optického vláknového senzoru. Práce obsahuje teoretické podklady k pochopení vzniku polarizace a její zobrazení v prostoru prostřednictvím Poincarého koule a Stokesových vektorů. Dále je zde probráno měření optického výkonu a pohled na analogická měření z různých výzkumů. Praktická část je zaměřena na ověření změn parametrů vláknového senzoru při změně teploty v jeho okolí a její součástí jsou návrhy na různé typy měření a ověření funkčnosti fotodiody jako snímače optického výkonu. Většina provedených měření je založena na srovnávání výsledků získaných pomocí polarimetru. Výsledky byly vyneseny do grafických závislostí a prodiskutovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, vektor elektrického pole, dvojlom, polarizační vlákno, Poincarého koule, Stokesův vektor, DOP, teplota, senzorické vlákno, optický výkon.

ABSTRACT

This master's thesis deals with the analysis of the optical power measurement using an optical fiber sensor. The thesis contains the theoretical background to understand the origin of polarization and its representation in space using Poincaré's sphere and Stokes vectors. There is also a part describing optical performance measurement and the preview of analog measurements from various researches. Practical part focuses on verification of changes of fiber sensor parameters at temperature change in its surroundings and this part includes also additional suggestions for various types of measurements and verification of the function of the photodiode as an optical power transducer. Most measurements are based on the comparison of results obtained with the polarimeter. The results were plotted and discussed.

KEYWORDS

Polarization, vector of electric field, birefringence, polarization fiber, Poincaré sphere, Stokes vector, DOP, temperature, sensory fiber, optical power.

DRÁBEK, Jakub. *Měření parametrů polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru*. Brno, 2018, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření parametrů polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi CSc. a mému konzultantovi Ing. Martinu Kyselákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován pomocí komponentů s podporou firmy SQS vláknová optika.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod	13
1 Polarizace světla	14
1.1 Světlo	14
1.1.1 Vektor elektrického pole	14
1.1.2 Birefringence – dvojlomnost	15
1.2 Typy polarizace světla	15
1.2.1 Polarizace odrazem – Brewsterův úhel	15
1.2.2 Polarizace lomem	16
1.2.3 Polarizace dvojlomem	16
1.2.4 Polarizace polaroidem	17
1.3 Stupeň polarizace – DOP	17
1.4 Polarizační vlákna	18
1.5 Polarizační elipsa	18
1.6 Degenerované polarizační stavy	19
1.7 Poincarého pozorovatelná koule	20
1.7.1 Degenerované stavy v Poincarého kouli	21
1.8 Stokesovy polarizační parametry	22
1.8.1 Stokesovy vektory pro elipticky polarizované světlo	23
1.8.2 Stokesovy vektory pro degenerované stavy	23
1.9 Měření optického výkonu	24
2 Poznatky z nezávislých zdrojů	25
2.1 Měření teploty a citlivosti napětí pomocí PM vláken s vysokým dvoj- lomem	25
2.2 Měření teploty na optickém vlákne pomocí interferometru	27
3 Měření pomocí polarimetru	30
3.1 Použité komponenty	30
3.1.1 Laserová dioda	30
3.1.2 PM vlákno, senzorické vlákno	30
3.1.3 Polarimetr	31
3.2 Schéma zapojení	32
3.3 Vynesení výsledků z polarimetru	34
4 Návrh měření	37
4.1 Navrhované komponenty	37
4.1.1 Fotodioda	37

4.1.2	Přípravek pro vybuzení os	37
4.1.3	Měřič výkonu a multimetr	37
4.1.4	Lineární polarizátor	38
4.1.5	Dělič výkonu zachovávající polarizaci	38
4.1.6	Měřic optického výkonu VEGA	38
4.1.7	Spektrální analyzátor	39
4.2	Návrh zapojení s fotodiodou	41
4.3	Návrh měření s měřičem optického výkonu VEGA	42
4.4	Návrh na přesné měření vlnové délky	43
5	Realizace návrhů měření	44
5.1	Měření s děličem výkonu zachovávajícím polarizaci	44
5.1.1	Rozdělení výkonu: polarimetr 10 %, fotodioda 90 %	44
5.1.2	Rozdělení výkonu: polarimetr 90 %, fotodioda 10 %	48
5.2	Měření na přístroji VEGA	51
5.2.1	Vynesení výsledků z polarimetru	51
5.2.2	Vynesení výsledků z měřiče VEGA	52
5.3	Měření na spektrálním analyzátoru	53
5.3.1	Vynesení výsledků z polarimetru	53
5.3.2	Vynesení výsledků ze spektrálního analyzátoru	54
6	Diskuse nad naměřenými údaji	55
6.1	Stokesův vektor při 90 a 10 % výkonu	55
6.2	Stokesův vektor a výkon na fotodiodě	56
6.3	Srovnání DOP a výkonu fotodiody	57
6.4	Srovnání DOP a výkonu na měřiči VEGA	58
6.5	Stokesův vektor a spektrální analyzátor	59
7	Závěr	60
	Literatura	61
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
	Seznam příloh	65
A	Obsah přiloženého DVD	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření elektromagnetické vlny	14
1.2	Vznik vektoru elektrického pole \vec{E} [3]	14
1.3	Znázornění vektoru \vec{E} nepolarizovaného a lineárně polarizovaného světla [5]	15
1.4	Brewsterův odraz světla [1]	16
1.5	Druhy PM vláken [9]	18
1.6	Polarizační elipsa [1]	19
1.7	Degenerované stavy polarizace [1]	20
1.8	Poincareho koule [1]	21
1.9	Degenerované stavy v Poincareho kouli [1]	22
1.10	Směr Stokesových vektorů [1]	23
1.11	Směr Stokesových vektorů [1]	23
1.12	Příklad měření výkonu na optické trase [11]	24
1.13	Graf citlivosti detektoru v závislosti na vlnové délce a materiálu [14]	24
2.1	Zapojení s dynamickou polarimetrickou metodou	25
2.2	Schématické zapojení pro měření teplotní citlivosti	26
2.3	Graf fázového posunu v závislosti na teplotě 3 typů vláken	26
2.4	Schématické zapojení teplotního senzoru s PM vláknem	27
2.5	Vylepšené schématické zapojení teplotního senzoru s PM vláknem	28
2.6	Kalibrace polovodičového senzoru teploty pomocí digitálního termo- metru	28
2.7	Teplotní závislost optického teplotního senzoru s 100 mm optickým retardérem při rozsahu teplot -6,1 až 65,9°C	29
2.8	Teplotní závislost optického teplotního senzoru s 11,5 mm optickým retardérem při rozsahu teplot -8,4 až 86,5°C	29
3.1	LED Driver DC2200	30
3.2	Princip polarimetru [15]	31
3.3	Vzhled PC prostředí připojeného k polarimetru	31
3.4	3D pohled na měřicí schéma	32
3.5	Boční a horní pohled na měřicí schéma	33
3.6	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1	34
3.7	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2	35
3.8	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3	35
3.9	Znázornění stupně polarizace DOP	36
4.1	Polarizační dělič výkonu	38
4.2	Měřič optického výkonu VEGA	38
4.3	Prostředí programu OPHIR Starlab	39

4.4	Spektrální analyzátor HR2000+	40
4.5	Vzhled pracovní prostředí programu OceanView	40
4.6	Schématické zapojení s děličem výkonu zachovávajícím polarizaci . . .	41
4.7	Schématické zapojení s měřícím přístrojem optického výkonu VEGA .	42
4.8	Schématické zapojení se spektrálním analyzátozem	43
5.1	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1	45
5.2	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2	45
5.3	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3	46
5.4	Znázornění stupně polarizace DOP	46
5.5	Optický výkon snímáný fotodiou převedený na napětí při 90 % výkonu	47
5.6	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1	48
5.7	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2	48
5.8	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3	49
5.9	Znázornění stupně polarizace DOP	49
5.10	Optický výkon snímáný fotodiou převedený na napětí při 10 % výkonu	50
5.11	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2	51
5.12	Znázornění stupně polarizace DOP	51
5.13	Optický výkon změřený měřícím přístrojem VEGA	52
5.14	Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2	53
5.15	Znázornění stupně polarizace DOP	53
5.16	Znázornění intenzity spektra	54
6.1	Srovnání Stokesových vektorů S_2 při rozdílném výkonu z optické trasy	55
6.2	Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem výkonu na fotodiodě . . .	56
6.3	Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem výkonu na fotodiodě . . .	56
6.4	Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na fotodiodě	57
6.5	Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na fotodiodě	57
6.6	Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na měřiči VEGA . . .	58
6.7	Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem intenzity na spektrálním an.	59
6.8	Srovnání parametru DOP s průběhem intenzity na spektrálním an. .	59

SEZNAM TABULEK

4.1	Tabulka kalibrace spektrálního analyzátoru	39
5.1	Základní parametry pro realizovaná měření	44

ÚVOD

Výzkum optických vláknových senzorů v současné době již dost pokročil, avšak stále se musí zkoumat jednotlivé vlastnosti, parametry a nelineární jevy u těchto senzorů, aby je bylo možné použít i mimo laboratorní podmínky. Využití senzorů by mohlo být užitečné v mnoha aplikacích jako například vyhodnocení změny teploty v trezoru při jeho otevření nebo přiblížení se k senzoru v hlídané oblasti.

Úkolem diplomové práce je analýza problematiky měření optického výkonu s využitím optického vláknového senzoru. Teoretická část práce je zaměřena na základy o světle a hlavně jeho vektoru elektrického pole. Dále popisuje možnosti vzniku polarizace, vlastnosti polarizačních vláken a poznatky z analogických měření z nezávislých zdrojů.

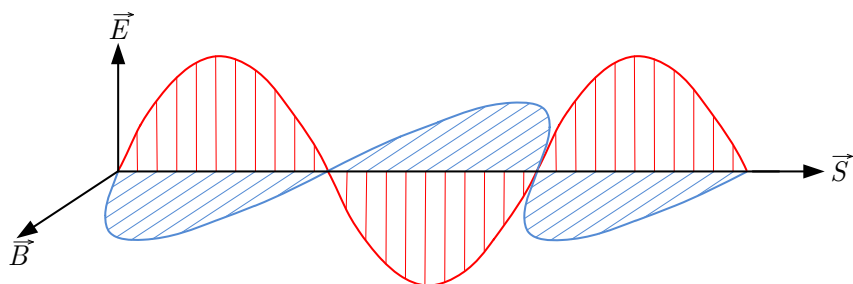
Hlavním cílem praktické části práce je přinést důkaz o změně chování parametrů optického polarizačního vlákna jako senzoru teploty při změně teplotních podmínek v jeho okolí. Nejprve bylo provedeno měření na polarimetru pro získání základních poznatků o měření. Navazující část práce pak nabízí různé typy měření, kde účelem toho hlavního měření bylo ověření funkčnosti méně nákladné fotodiody jako snímače na výstupu polarizačního optického vlákna. V praktické části bylo rovněž provedeno velmi přesné měření vlnové délky na spektrálním analyzátoru při změně teploty senzorického vlákna.

Poslední část práce se zabývá vynesáním získaných hodnot do grafických závislostí, jejich komentářem a následným srovnáním.

1 POLARIZACE SVĚTLA

1.1 Světlo

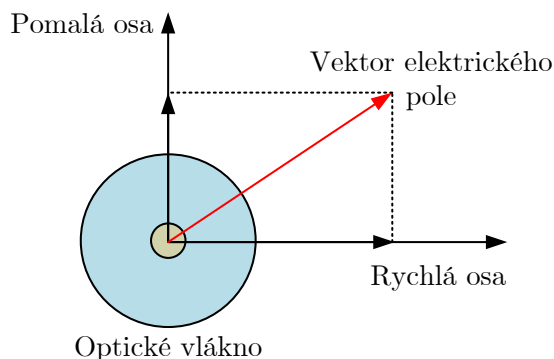
Z výzkumu elektromagnetického pole je již známo, že světlo patří mezi elektromagnetická vlnění. Světlo je složeno ze dvou složek, a to ze složky elektrické, která je reprezentována vektorem elektrického pole \vec{E} a složky magnetické, kterou reprezentuje vektor magnetické indukce \vec{B} . Tyto dvě složky neboli vektory jsou na sebe navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé ke směru šíření světla [5, 6].



Obr. 1.1: Šíření elektromagnetické vlny

1.1.1 Vektor elektrického pole

Jak již bylo výše zmíněno, světlo se skládá ze dvou vektorů. U optických vláken je nejvýznamnější vektor elektrického pole \vec{E} . Tento vektor vzniká jako skalární součet dvou vektorů neboli hlavních stavů polarizace – PSP (*Principal State of Polarization*), takzvané „rychlé“ a „pomalé“ osy šíření. Hlavní polarizační stavy se v optickém vlákně šíří různými rychlostmi a jsou na sebe kolmé. Zpoždění, které mezi jednotlivými stavy vzniká se nazývá skupinové zpoždění – DGD (*Differential Group Delay*). Velikost zpoždění většinou nabývá hodnot v jednotkách pikosekund (ps) [3].



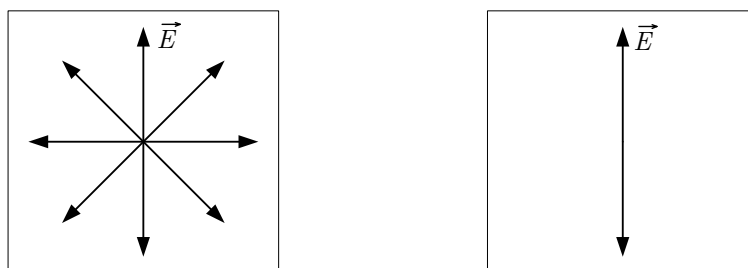
Obr. 1.2: Vznik vektoru elektrického pole \vec{E} [3]

1.1.2 Birefringence – dvojlomnost

Pojmem birefringence je nazývána optická vlastnost anizotropních materiálů, díky které dochází ke dvojitému odrazu světla v průhledném a molekulárně uspořádaném materiálu. V materiálu se to projevuje výskytem orientačně závislých rozdílů v indexu lomu a výsledná birefringence se získá jako maximální rozdíl mezi indexy lomu materiálu. Princip, který objasnil dánský vědec Bartholin, spočívá v dopadu světelného paprsku na dvojlomný materiál, který polarizuje jeden paprsek na dva, jenž mají lechce odlišný směr cesty šíření [4].

1.2 Typy polarizace světla

Při běžném šíření světla může vektor intenzity elektrického pole \vec{E} oscilovat ve všech směrech své roviny kolmé na osu x pod libovolným úhlem od 0° po 360° . Takové světlo se nazývá nepolarizované (obr. 1.3 vlevo). Pro získání lineárně polarizovaného světla musí vektor intenzity elektrického pole \vec{E} oscilovat pouze v jednom směru své roviny (obr. 1.3 vpravo). Lineárně polarizované světlo lze získat několika možnými způsoby, které jsou uvedeny dále [5, 6].



Obr. 1.3: Znázornění vektoru \vec{E} nepolarizovaného a lineárně polarizovaného světla [5]

1.2.1 Polarizace odrazem – Brewsterův úhel

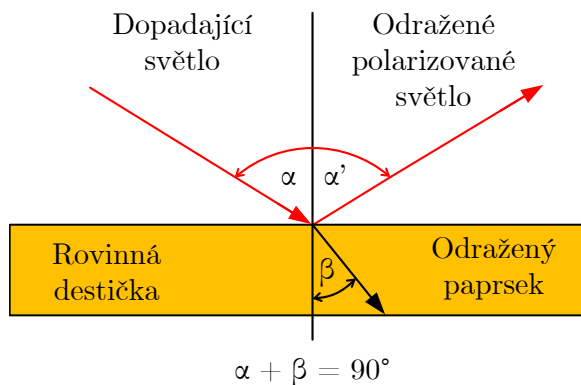
Šířící se paprsek nepolarizovaného světla dopadá pod úhlem dopadu α na rovinou destičku a odráží se podle zákona o odrazu světla (1.1) pod úhlem α' . Paprsek odražený pod úhlem α' je částečně lineárně polarizován a jeho vektor intenzity elektrického pole \vec{E} bude tedy oscilovat v jedné rovině, která je kolmá na rovinu dopadu. Pomocí úhlu dopadu lze určit stupeň polarizace – DOP (*Degree of Polarization*).

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1.1)$$

kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu jednotlivých prostředí [1, 5].

Podle typu rovinné destičky se může paprsek dále lámat přes destičku, stane se tak pokud je destička z propustných nebo průsvitných materiálů. Pod určitým úhlem, který se nazývá Brewsterův úhel α_B , dochází k úplné lineární polarizaci odraženého světla. Brewsterův úhel se mění v závislosti na indexu lomu odrazového prostředí n_2 a vlnové délce polarizovaného světla. Poté platí rovnice: [5, 1]

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_2. \quad (1.2)$$



Obr. 1.4: Brewsterův odraz světla [1]

1.2.2 Polarizace lomem

Světlo se láme při dopadu na rozmezí dvou prostředí a dále se šíří druhým prostředím. V tomto případě je světlo pouze částečně polarizováno a vždy se proto jedná o polarizaci neúplnou. [6, 5].

1.2.3 Polarizace dvojlomem

Polarizace dvojlomem vzniká u speciálních anizotropních krystalů, u kterých procházející paprsek závisí na optických vlastnostech krystalů. Příkladem těchto krystalů je islandský vápenec. Dopadající paprsek světla na takovýto krystal se lomí na dva paprsky. První je nazýván řádný (řídí se zákonem lomu a jeho index lomu je konstantní) a druhý paprsek – mimořádný, ten se neřídí zákonem lomu a jeho index lomu je závislý na směru světla šířícího se krystalem. Tomuto jevu říkáme dvojlom. U obou paprsků dojde k úplné lineární polarizaci a vektory intenzity elektrického pole oscilují ve vzájemně kolmých rovinách [6, 5].

1.2.4 Polarizace polaroidem

Polaroid ve své podstatě představuje polarizační filtr, který je speciálně upraven pro získání polarizovaného světla. Je vyroben ze dvou vrstev průhledného plastu, mezi kterými se vyskytuje látka s podlouhlou molekulární strukturou. Molekuly jsou při výrobním postupu zarovnány rovnoběžně s jejich podlouhlými osami. U nepolarizovaného světla vstupujícího do polaroidu bude v jednom směru intenzita elektrického pole absorbována a v druhém kolmém směru bude zčásti propuštěna [6, 5].

1.3 Stupeň polarizace – DOP

Stupeň polarizace DOP (*Degree of Polarization*) vyjadřuje množství použité k popisu části elektromagnetické vlny, která je polarizována. Úplně polarizovaná vlna má $\text{DOP} = 100\%$, zatímco nepolarizovaná vlna má $\text{DOP} = 0\%$. Částečně polarizovaná vlna se tedy vyskytuje v rozmezí $0 - 100\%$. DOP lze také ekvivalentně definovat pomocí použití Stokesových vektorů:

$$\text{DOP} = \frac{I_{\text{pol}}}{I_{\text{clk}}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (1.3)$$

kde I_{pol} je intenzita polarizovaného světla, I_{clk} nebo také S_0 je celková intenzita světla [1, 7].

Matematicky, v Poincarého kouli, DOP představuje vzdálenost tří posledních normalizovaných složek Stokesových vektorů od původu. DOP se tedy může vizualizovat pomocí reprezentace polarizovaného paprsku v Poincarého kouli. V takovém znázornění se DOP rovná délce vektoru měřeného od středu koule. Povrch Poincarého koule odpovídá $\text{DOP} = 100\%$ a reprezentuje všechny polarizované stavy [1, 7, 8].

Dále může být DOP rozlišeno podle typu polarizace, to se projeví ve změně použitých Stokesových vektorů pro výpočet. U lineární polarizace bude platit vzorec:

$$\text{DOP}_{\text{lin}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (1.4)$$

a pro kruhovou polarizaci:

$$\text{DOP}_{\text{kruh}} = \frac{S_3}{S_0} [8]. \quad (1.5)$$

Z výše zmíněných rovnic lze snadno odvodit celkové DOP:

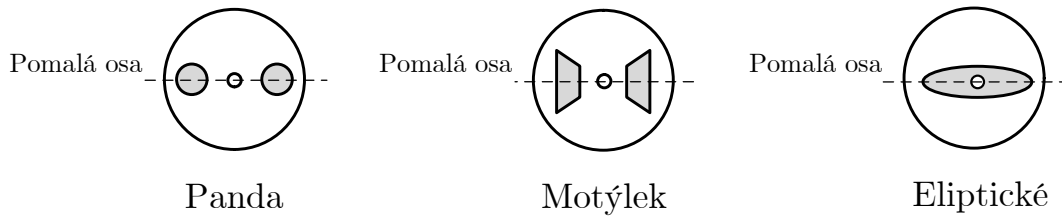
$$\text{DOP} = \sqrt{(\text{DOP}_{\text{lin}})^2 + (\text{DOP}_{\text{kruh}})^2} [8]. \quad (1.6)$$

1.4 Polarizační vlákna

Vzhledem k tomu, že klasická jednovidová vlákna nejsou schopna udržet stav polarizace v optickém vlákně, bylo vyvinuto speciální vlákno udržující polarizaci, které se nazývá polarizační vlákno – PM vlákno (*polarization maintaining fiber*). Pokud bude do PM vlákna navázán optický signál, vlákno zaručí zarovnání signálu s jednou z os (většinou se jedná o pomalou osu, dle průmyslové konvence) a tento stav udržuje po celou dobu až na výstup vlákna, a to i v případě ohybu vlákna. Jednotlivé osy se při šíření vláknem navzájem zrychlují a zpomalují. Vzniká tak mezi nimi zpoždění, ale na výstupu PM vlákna již toto zpoždění není a osy jsou srovnány [9].

Funkce udržování polarizace je mimořádně důležitá pro některé optické komponenty, mezi které patří například optické modulátory, jenž vyžadují vstup polarizovaného optického světla. Vlastnost udržování polarizace je dosažena specifickým výrobním procesem, kdy je použitý materiál namáhán během výroby. Vedle vláknového jádra se ve vláknech vyskytují tzv. napínací tyčinky, podle nichž lze také rozeznat různé typy PM vláken [9].

Mezi základní typy PM vláken patří typ Panda (*polarization maintaining and absorption-reducing*), kde jsou dvě kruhové napínací tyčinky, které vytváří mechanický tlak a tím dochází ke zvýšení dvojlomu. Druhým typem je vlákno nazývané v překladu jako motýlek (*Bow-tie*), toto vlákno pracuje na stejném principu jako vlákno Panda, avšak tyčinky mají specifický tvar. Posledním ze základních typů je eliptické vlákno (*Elliptical-clad*), které využívá pro zvýšení dvojlomu nesymetrického jádra. Všechny zmíněné typy lze vidět na následujícím obrázku (1.5) [9, 10].



Obr. 1.5: Druhy PM vláken [9]

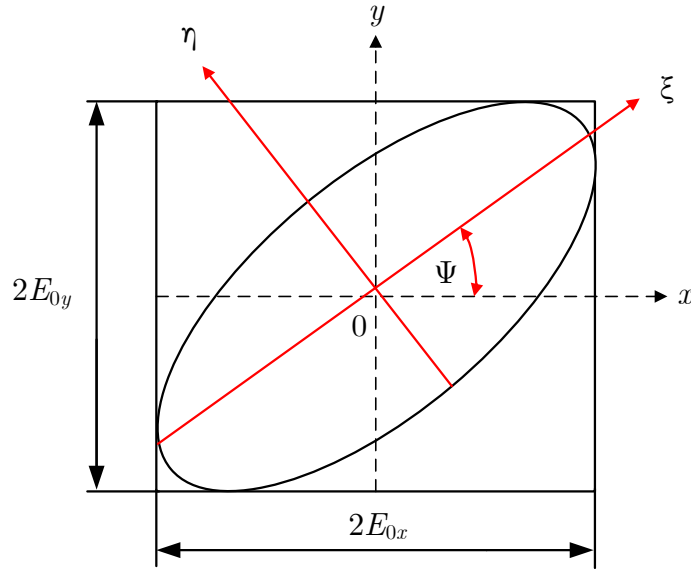
1.5 Polarizační elipsa

Pokud špička vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} mění se v čase opisuje elipsu, tak následně vzniká polarizační elipsa. Podle výzkumu Fresnelovy vlnové teorie $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ popisují vzájemnou sinusovou oscilaci v rovinách $x - z$ a $y - z$. U rovnice elipsy je však vyloučeno použití propagátoru časového prostoru $\omega t - kz$ a rovnice elipsy má tedy tvar:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}}\cos\delta = \sin^2\delta, \quad (1.7)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$ [1].

Výše zmíněná rovnice popisuje rovnici elipsy vztaženou k polarizovanému světlu. Složky $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ zde zůstávají závislé na čase. Na následujícím obrázku (1.6) je ukázán rotační $\xi - \eta$ souřadnicový systém. Kvůli konstantním amplitudám E_{0x} , E_{0y} a fázi δ zůstává polarizační elipsa pevná, jak se šíří paprsek [1].

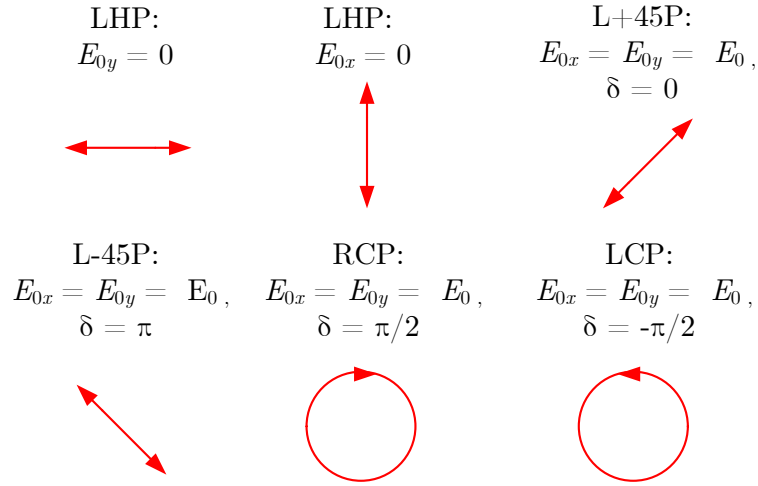


Obr. 1.6: Polarizační elipsa [1]

1.6 Degenerované polarizační stavy

Obecně platí, že optické pole je polarizováno elipticky, ale existuje i několik kombinací amplitudy a fáze, které jsou obzvlášť důležité. Tyto stavy jsou nazývány jako degenerované polarizační stavy–DPS (*Degenerate Polarization States*). Mezi DPS patří následující stavy:

- lineárně horizontální polarizované světlo – linearly horizontal polarized light – LHP,
- lineárně vertikální polarizované světlo – linearly vertical polarized light – LVP,
- lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo – linearly $+45^\circ$ polarized light – L+45P,
- lineárně -45° polarizované světlo – linearly -45° polarized light – L-45P,
- pravé kruhově polarizované světlo – right circularly polarized light – RCP,
- levé kruhově polarizované světlo – left circularly polarized light – LCP [1].



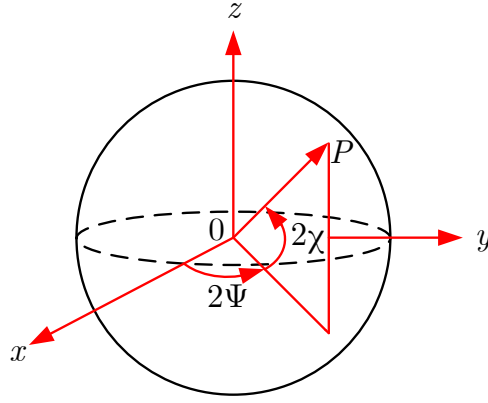
Obr. 1.7: Degenerované stavy polarizace [1]

Světlo RCP rotuje ve směru hodinových ručiček a LCP v protisměru, při šíření směrem k pozorovateli. Výše zmíněné DPS jsou velice důležité a relativně jednoduše realizovatelné v laboratorních podmínkách pomocí lineárních a kruhových polarizátorů. Většina polarizačních měření a výpočtů je zjednodušena díky použití těchto polarizačních stavů. Využívají se zejména tehdy, pokud se paprsek šíří více polarizačními prvky [1].

1.7 Poincarého pozorovatelná koule

Samotná polarizační elipsa je výborným způsobem, jak vizualizovat polarizované světlo. Nicméně, kromě DPS je prakticky nemožné určit úhly orientace a elipticity, které zobrazují polarizační elipsu. Další nevýhodou jsou obtížné a zdlouhavé výpočty nových úhlů polarizačních paprsků, které se šíří více polarizačními prvky. Pro překonání těchto potíží navrhnul Poincaré použití koule, známou jako Poincarého koule (*Poincaré sphere*) pro reprezentaci polarizovaného světla [1].

Na obrázku (1.8) jsou znázorněny kartézské souřadnicové osy x , y , z , dále sférický úhel orientace ψ a úhel elipticity χ polarizační elipsy. Bod P je bod povrchu koule. Ve spojení Poincarého koule se Stokesovými polarizačními parametry přechází souřadnicové osy x , y , z na vektory S_1 , S_2 a S_3 .



Obr. 1.8: Poincarého koule [1]

Pro jednotkovou Poincarého kouli platí rovnice:

$$\begin{aligned} x &= \cos(2\chi)\cos(2\psi), 0 \leq \psi < \pi, \\ y &= \cos(2\chi)\sin(2\psi), -\frac{\pi}{4} < \psi \leq \frac{\pi}{4} \\ z &= \sin(2\psi), \end{aligned} \tag{1.8}$$

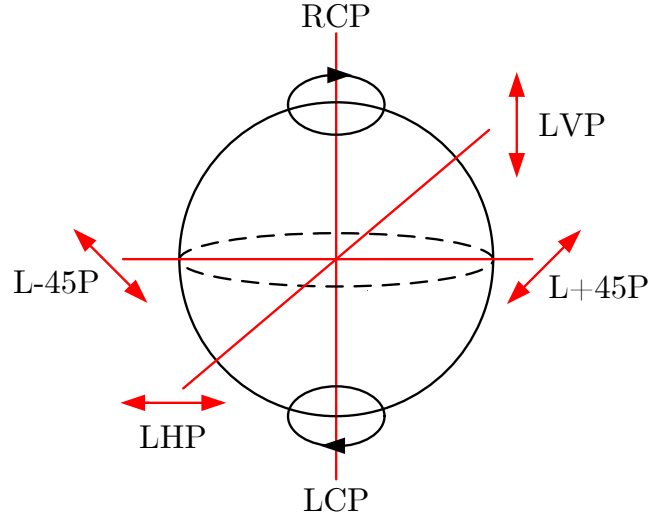
kde $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, pro kouli s poloměrem jedna [1].

1.7.1 Degenerované stavy v Poincarého kouli

Z předchozích rovnic bylo zjištěno, že jakýkoliv stav může být reprezentován pomocí páru souřadnic (2ψ a 2χ). DPS v Poincarého kouli jsou poté popsány následovně:

- LHP ($0^\circ, 0^\circ$),
- L+45P ($90^\circ, 0^\circ$),
- LVP ($180^\circ, 0^\circ$),
- L-45P ($270^\circ, 0^\circ$),
- RCP ($0^\circ, 90^\circ$),
- LCP ($0^\circ, -90^\circ$) [1].

Všechny stavy lineární polarizace leží na rovníku, práva a levá kruhová polarizace je na severním a jižním pólu. Elipticky polarizované stavy jsou reprezentovány všude na povrchu koule [1].



Obr. 1.9: Degenerované stavy v Poincareho kouli [1]

1.8 Stokesovy polarizační parametry

Nejzávažnějším omezením pro Poincarého kouli spolu s polarizační elipsou je problém polarizace elipsy, která vyjadřuje okamžitou reprezentaci polarizovaného světla. Dále úhel rotace ψ a úhel elipticity χ nejsou přímo měřitelné. K překonání zmíněných omezení se musí určit měřitelné hodnoty polarizovaného pole. To lze například provést pořízením časového průměru polarizační elipsy (viz. rovnice elipsy 1.7). Časový průměr $\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \rangle$ je poté definován následovně [1]:

$$\left\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \right\rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t)E_j(z, t) dt, \quad (1.9)$$

kde $i, j = x, y$, T je celkový průměrný čas [1].

Aplikuje-li se definice časového průběhu na polarizační elipsu, získá se následující rovnice:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1.10)$$

poté jsou jednotlivé složky vyjádřeny takto:

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ S_2 &= 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ S_3 &= 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta, \end{aligned} \quad (1.11)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$ [1].

Množství S_1 , S_2 a S_3 jsou pozorovatelná polarizovaným polem. Tyto parametry byly představeny Stokesem a jsou nazývány Stokesovy polarizační parametry [1].

1.8.1 Stokesovy vektory pro elipticky polarizované světlo


Pro elipticky polarizované světlo je vhodné Stokesovy parametry uspořádat jako matici sloupců, které nesou označení jako Stokesovy vektory pro elipticky polarizované světlo. Poté je dosaženo tohoto tvaru [1]:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{pmatrix}, \quad (1.12)$$

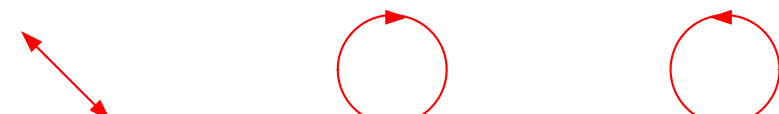
kde $I = S_0$ je celková intenzita světelného paprsku, $Q = S_1$ je parametr představující horizontální a vertikální polarizaci, $U = S_2$ vyjadřuje polarizaci v úhlech -45° a $+45^\circ$ na osu x . Poslední parametr $V = S_3$ reprezentuje rozdíl levotočivé a pravotočivé kruhové polarizace [1, 8].

1.8.2 Stokesovy vektory pro degenerované stavy

Z výše zmíněných rovnic a definic lze Stokesovy stavy rychle určit:

$$S_{\text{LHP}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{\text{LVP}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{\text{L+45P}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.13)$$


Obr. 1.10: Směr Stokesových vektorů [1]

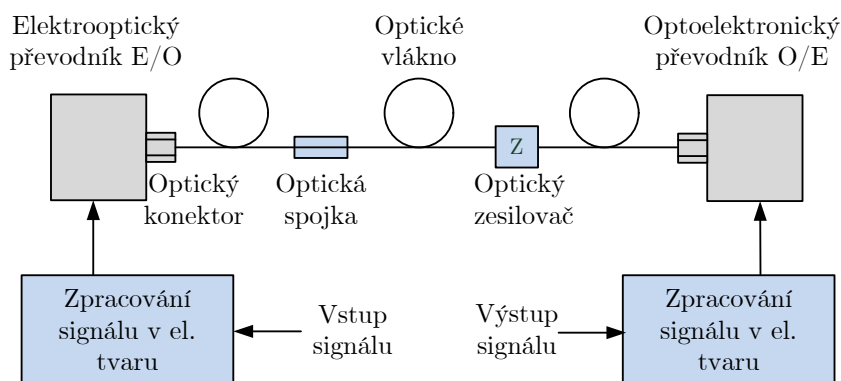
$$S_{\text{L-45P}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{\text{RCP}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad S_{\text{LCP}} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (1.14)$$


Obr. 1.11: Směr Stokesových vektorů [1]

kde I_0 je intenzita světla [1].

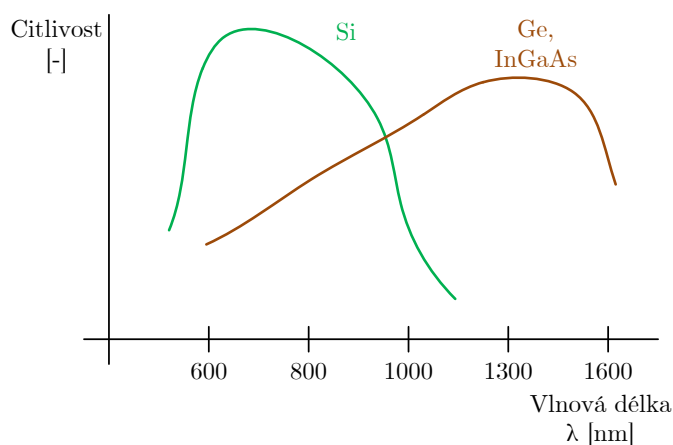
1.9 Měření optického výkonu

Měření optického výkonu představuje jedno ze základních měření, která jsou prováděna na optických vláknech. Většinou je cílem měřit přímo optický výkon. To však není až tak jednoduché, jelikož snímačem pro měření je obvykle fotodioda, a ta pracuje na elektrickém principu. Obvyklým postupem pro vyřešení vzniklého nesouladu je instalace O/E převodníku do zapojení, jež přemění optický signál na elektrický. Poté se měří elektrické napětí, proud generovaný fotodetektozem a nakonec je dokončen převod podle známých vztahů na veličinu výkonu ve Watttech [8, 14].



Obr. 1.12: Příklad měření výkonu na optické trase [11]

Optické měřicí přístroje používají převážně polovodičové detektory, protože jsou velmi citlivé na světlo v různých vlnových délkách. Citlivost detektorů závisí na materiálu, který byl použit pro jejich výrobu. Nejčastějšími materiály pro měřicí přístroje jsou křemík (Si), germanium (Ge) nebo indium-galium-arsenid (InGaAs). Křemíkové diody jsou nejcitlivější v oblasti vlnové délky 400–1000 nm, germaniové a diody InGaAs mají největší citlivost v oblasti 800–1600 nm [14].



Obr. 1.13: Graf citlivosti detektoru v závislosti na vlnové délce a materiálu [14]

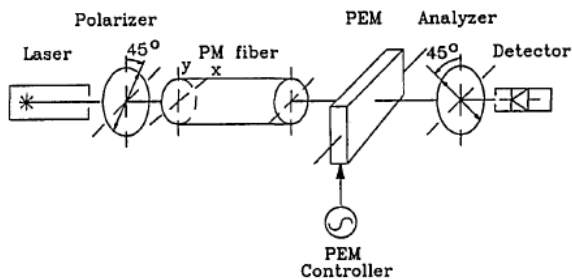
2 POZNATKY Z NEZÁVISLÝCH ZDROJŮ

Kapitola představuje soubor článků majících určité podobnosti s měřením prováděným v této práci a mohly by být použity pro návrh dalšího měření. Principy zmíněných měření jsou založeny na použití PM vlákna jako teplotního senzoru.

2.1 Měření teploty a citlivosti napětí pomocí PM vláken s vysokým dvojlomem

Článek se zabývá novou generací senzorů, které jsou založeny na PM vláknech a jejich vysoké dvojlomnosti materiálu (birefringence). Vysoké dvojlomnosti může být u těchto vláken dosaženo vestavěným zatížením nebo geometrickou deformací. Pokud je dopadající lineárně polarizované světlo shodné s jednou z os, vertikální nebo horizontální, může být stav polarizovaného světla těchto vláken dobře udržován. Nicméně, pokud je světelný signál jedné z os pootočen o 45° , dochází k vybuzení obou os a vlákno, v tuto dobu použito jako vláknový senzor, je velmi citlivé a dochází k fázovým změnám obou os. Zmíněné vlastnosti jsou důležité při použití vysoce dvojlomných vláken jako senzorů závislých na polarizaci a pro koherentní optické přenosové systémy. Různorodost techniky výroby PM vláken způsobuje jejich různé vlastnosti v závislosti na změnách vnějších podmínek jako například teplota, napětí, ohýbání a tlak. Musí se tedy porovnat více typů vláken [12].

Polarimetrická metoda využívající polarizátor a analyzátor je v principu jednoduchá a slouží jako základ pro polarimetrické senzory nebo detekční techniky. Při použití statické metody měření pro zpoždění pod 10° je citlivost měření špatná a metoda se potýká s vážnými chybami vyplývajícími z nedokonalých komponent. Zmíněné nedostatky obecně vznikají proto, že se měří statická dvojlomnost (birefringence). Bylo však zaznamenáno použití dynamické fotoelastické modulace k měření vláken s menší dvojlomností a jejich účinku na PM vlákna typu motýlek (Bow-tie) [12].

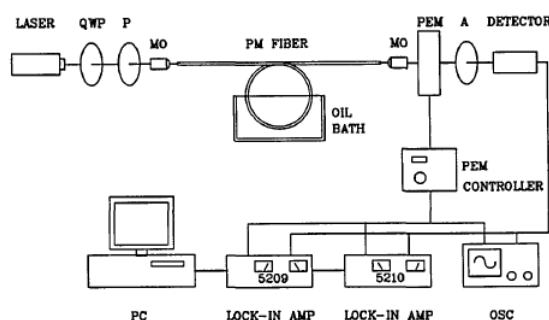


Obr. 2.1: Zapojení s dynamickou polarimetrickou metodou, převzato z [12]

Na schématickém zapojení (2.1) je možné vidět zapojení se dvěma křížově orientovanými polarizátory na $\pm 45^\circ$ vzhledem k optické ose fotoelastického modulatoru (PEM). Mezi polarizátorem PEM bylo umístěno PM vlákno se zarovnáním rychlé a pomalé osy k optickým osám PEM ve směru x a y [12].

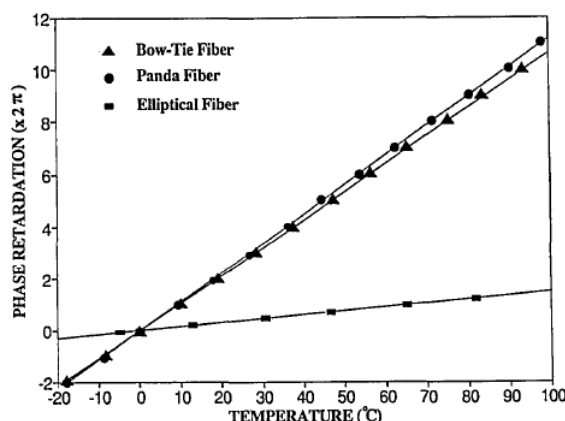
Článek popisuje experimentální měření teploty a citlivosti deformace tří běžných typů vysoce dvojlomných PM vláken: Panda, motýlek a eliptického vlákna. Měření bylo založeno na dynamické metodě měření. Následující část bude zaměřena hlavně na měření zabývající se teplotou [12].

Systém pro měření citlivosti teploty je zobrazen na následujícím obrázku (2.2), kdy 10 cm vlákna z celkové délky 1 m bylo udržováno bez napětí v lázni s parafínovým olejem měkkou svorkou [12].



Obr. 2.2: Schématické zapojení pro měření teplotní citlivosti, převzato z [12]

Teplotní změny byly prováděny pomocí topné desky a suchého ledu. Pro zamezení účinků vzduchu a změnám pokojové teploty byla zavedena metoda odmítnutí společného režimu tím, že celé vlákno bylo rozříznuto na dvě stejné délky a spojeno dohromady rotací 90° . Odstraněním rozdílů teplot bylo zabráněno pomocí vláken bavlny a polystyrenem v části, kde vlákno není ohříváno [12].

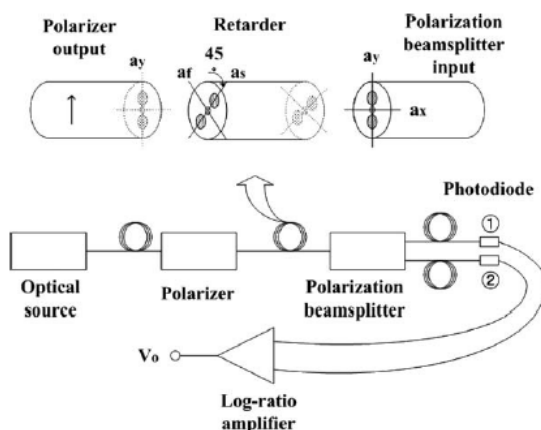


Obr. 2.3: Graf fázového posunu v závislosti na teplotě 3 typů vláken, převzato z [12]

Výsledkem měření bylo porovnání mezi třemi typy výše zmíněných vláken. Změřeno bylo porovnání fáze zpomalení vlastních polarizací v těchto vláknech v závislosti na teplotě. Měření bylo provedeno dynamickou polarimetrickou metodou, která je plně automatizovaná a řízená mikroprocesorem. Výsledky, které můžeme vidět na grafech vykazují, že při zvoleném měřicím rozsahu se fázová změna zvyšuje lineárně s teplotou. Výsledky teplotní citlivosti pro vlákno motýlek $7,35 \text{ rad/m}^\circ\text{C}$, Panda $7,57 \text{ rad/m}^\circ\text{C}$ a eliptické vlákno $1,1 \text{ rad/m}^\circ\text{C}$. Srovnáním výsledků měření teploty pro vlákno York HiBi (motýlek) s výsledky jiných výzkumných pracovníků ukazuje, že jejich průměrné hodnoty odpovídají změřeným průměrným hodnotám [12].

2.2 Měření teploty na optickém vlákně pomocí interferometru

Článek pojednává o metodě měření teploty založené na fázových rozdílech mezi principiálními polarizačními stavy. Polarizační stav optického paprsku se po průchodu sensorickým úsekem při změně teploty mění. Teplota je určena porovnáním rozdílů mezi hlavními polarizačními stavy [13].

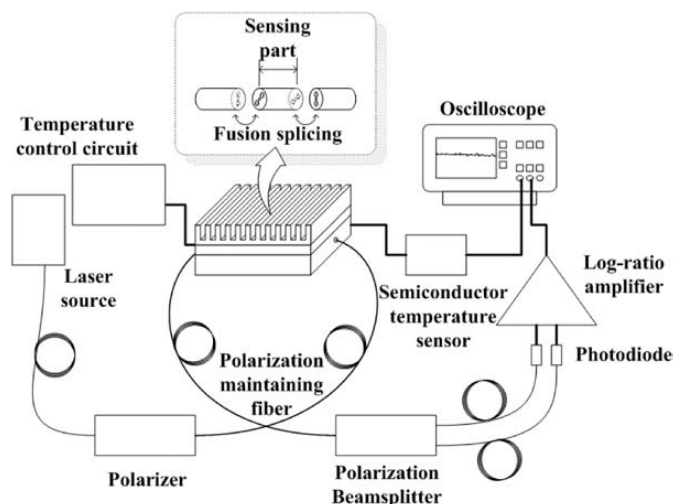


Obr. 2.4: Schématické zapojení teplotního senzoru s PM vláknem, převzato z [13]

Schématické zapojení (2.4) je složeno z lineárního polarizátoru, optického zpožďovacího členu orientovaného pod úhlem 45° , na který navazuje rozdělovač polarizačního paprsku. Dále dvě fotodiody a logaritmický zesilovač. Optický rozdělovač je zarovnán stejně jako polarizátor s osami x a y. Princip: dopadající světelný paprsek je polarizován na osu x pomocí lineárního polarizátoru a poté vstupuje do optického zpožďovacího členu pootočeného o 45° . Polarizační stavy rychlé a pomalé osy mají na vstupu do zpožďovacího členu shodnou amplitudu a fázi. Po průchodu zpožďovacím členem vznikne rozdíl mezi fázemi rychlé a pomalé osy, poté je paprsek rozdělen

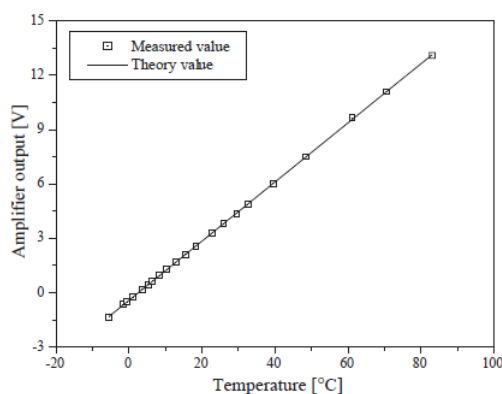
pomocí polarizačního děliče na polarizační komponenty x, y [13].

Pokud by byla vlnová délka optického paprsku konstantní a monochromatická, fázové rozdělení mezi dvěma osami by mohlo být určeno délkou a indexem lomu refrakce optického zpožďovacího členu, což je funkcí teploty. Optické paprsky opouštějící dělič polarizačního paprsku vstupují na dvě fotodiody, poté do logaritmického zesilovače a nakonec na osciloskop, kde je možné měřit výstupní napětí [13].

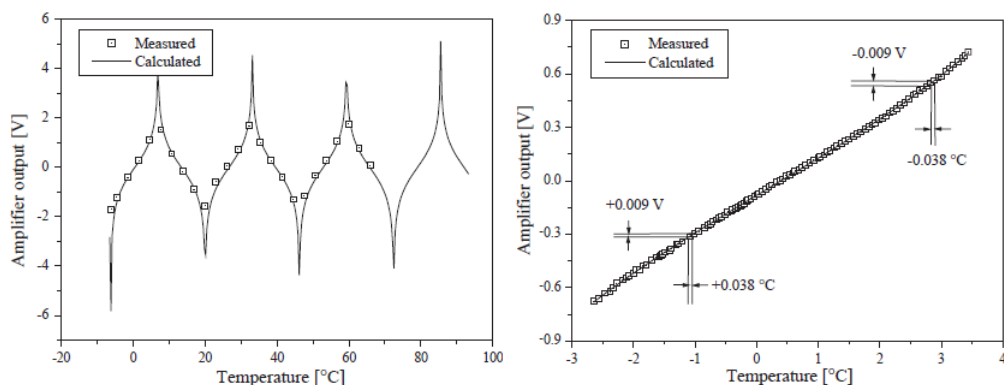


Obr. 2.5: Vylepšené schématické zapojení teplotního senzoru s PM vláknem, převzato z [13]

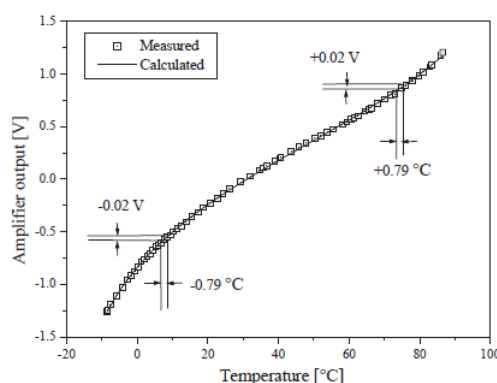
Na schématu můžeme vidět vylepšené zapojení, kde je jako zdroj světla použita laserová dioda a schéma je doplněno regulovatelnou teplotní komorou, ve které je umístěn senzor teploty. V měření bylo využito vlákno typu Panda a jednotlivé části byly spojeny svárem [13].



Obr. 2.6: Kalibrace polovodičového senzoru teploty pomocí digitálního termometru, převzato z [13]



Obr. 2.7: Teplotní závislost optického teplotního senzoru s 100 mm optickým retardérem při rozsahu teplot -6,1 až 65,9°C, převzato z [13]



Obr. 2.8: Teplotní závislost optického teplotního senzoru s 11,5 mm optickým retardérem při rozsahu teplot -8,4 až 86,5°C, převzato z [13]

Teplotní senzory z běžných optických vláken mají omezenou citlivost v důsledku amplitudy a fázového šumu zdroje světla. Potřebují rovněž nákladné obvody detekce a zdrojové modulace. V této práci byla navržena nová metoda analýzy měření teploty založená na jevu, kdy fázové rozdíly mezi hlavními polarizačními stavy v optickém zpožďovacím členu jsou funkcí teploty. Metoda je jednoduchá a nenákladná na použité komponenty a obvody. V tomto článku byla úspěšně prokázána nová metoda měření teploty použitím zpožďovacího členu, který je z optického polarizačního vlákna. Testovány byly dva prototypy teplotního snímače. První typ s délkou optického zpožďovacího členu 100 mm a měl rychlost fázové změny na teplotě 0,236 rad/°C v teplotním rozpětí -2,6 až 3,4 °C. Druhý typ o délce 11,5 mm měl rychlost fázové změny 0,021 rad/°C v teplotním rozpětí -8,5 až 86,5 °C [13].

3 MĚŘENÍ POMOCÍ POLARIMETRU

Měření se zabývá testováním optické trasy se senzorickým vláknem, které by mělo mít významné použití jako senzor pro zaznamenání změny teploty. Při změně teploty byla ověřována funkčnost teplotního senzoru, zda vyhodnocuje změnu polarizace způsobenou přiložením kádinky s ledovou tříští o teplotě 0 °C. Hodnoty získané z této měřené trasy byly vyhodnocovány pomocí polarimetru, zobrazeny v Poincarého pozorovatelné kouli a vyneseny do grafů.

3.1 Použité komponenty

3.1.1 Laserová dioda

Pro laboratorní měření byla jako zdroj světelného signálu použita kvalitní laserová dioda LPS-PM635-FC od firmy Thorlabs. Dioda pracuje na vlnové délce $\lambda = 635 \text{ nm}$. Koherentní laserový paprsek diody, který dosahuje polarizace až 99,9 %, je navázán do PM vlákna o délce 1 m. Ve vlákne je udržena polarizace šířící se elektromagnetické vlny a je zde zarovnána pomalá osa. Pracovní napětí přiváděné na diodu se pohybuje v rozmezí 2,2 až 2,7 V a je dodáváno pomocí LED Driver DC2200. Operační proud diody je 50 mA. Výstupní výkon diody se pohybuje okolo 2,5 mW [15].



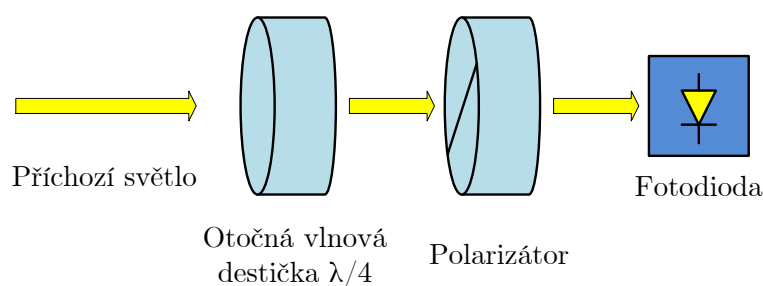
Obr. 3.1: LED Driver DC2200, převzato z <http://bit.ly/2rSXj8c>

3.1.2 PM vlákno, senzorické vlákno

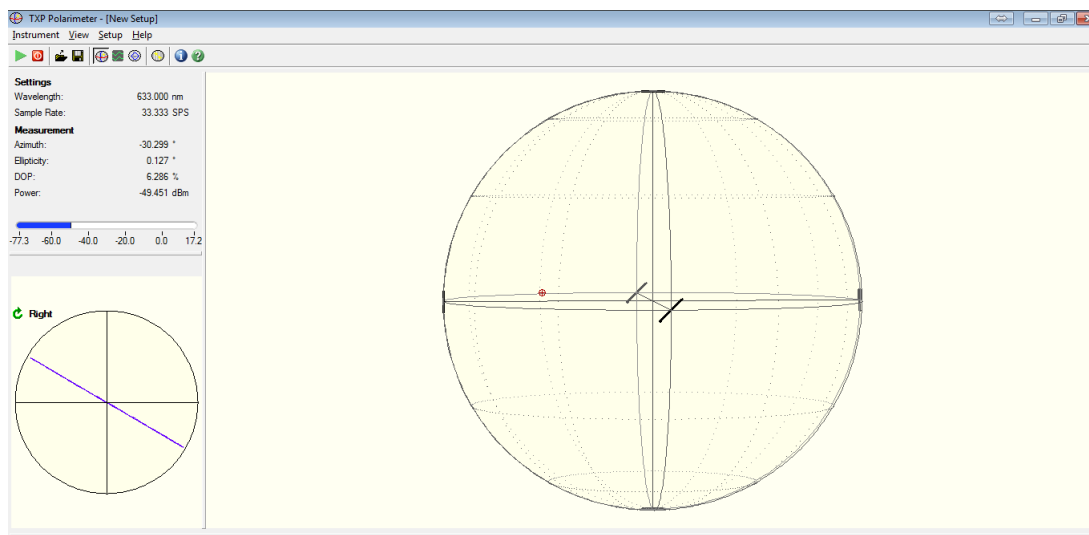
V měření se používají pouze vlákna zachovávající polarizaci typu PM 630-HP, kdy jejich celková délka po spojení dosahuje 4 m. Prostřední část o délce 2 m zde pracuje jako senzor teploty a je bez sekundárního ochranného pláště. Vlákna jsou určena pro pracovní vlnovou délku v rozmezí 620–850 nm.

3.1.3 Polarimetr

Koncovým zařízením měřící soustavy, jenž analyzuje měřící trasu, je polarimetr typu PAX5710VIS-T-TXP s hlavicí PAN5710. Celá soustava je zprostředkována od firmy Thorlabs a je napojená na PC, ve kterém jsou vynášeny výsledky. Princip je založen na přivedení optického signálu na hlavici, jež je složena z otočné vlnové destičky, pevného polarizátoru a fotodiody (viz 3.2). Vlnová destička nejprve transformuje vstupní polarizaci v závislosti na skutečném úhlu natočení. Polarizátor následně propouští jen část světelného signálu rovnoběžnou s osami přenosu. Na konci se nachází fotodetektor dodávající proud úměrný optickému výkonu. K přesnému výpočtu polarizačních stavů (SOP) a stupně polarizace (DOP) se používá rychlá Fourierova transformace [15].

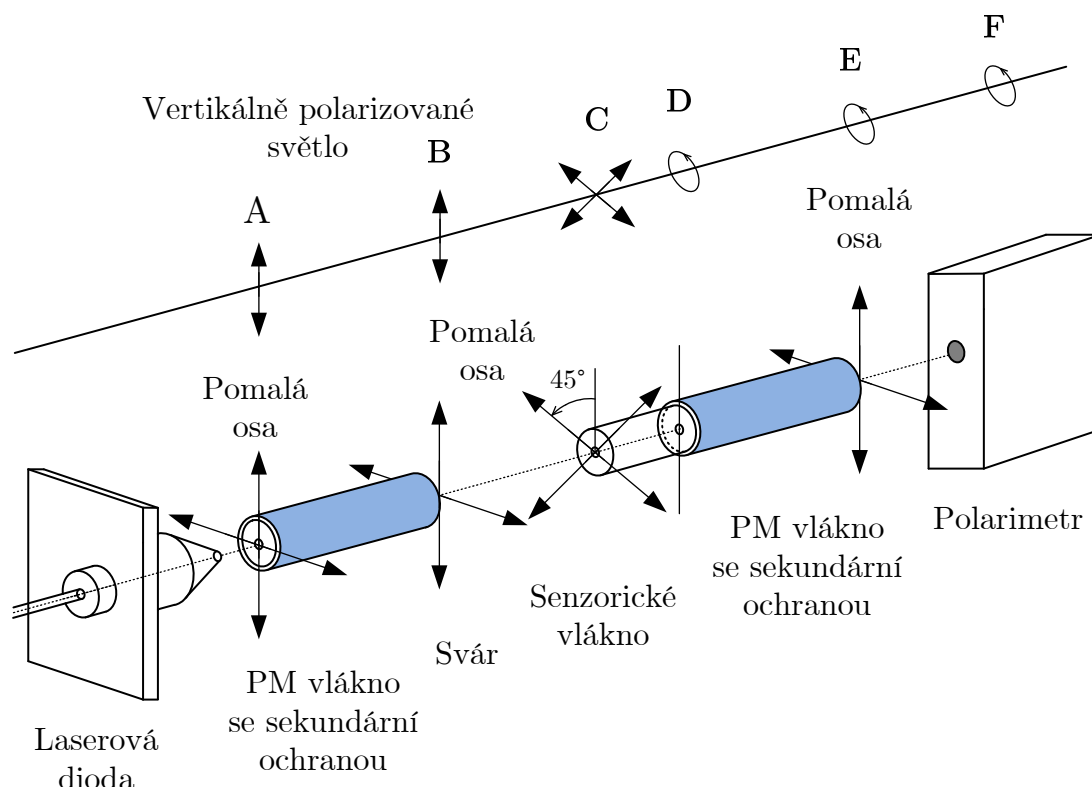


Obr. 3.2: Princip polarimetru [15]



Obr. 3.3: Vzhled PC prostředí připojeného k polarimetru

3.2 Schéma zapojení



Obr. 3.4: 3D pohled na měřící schéma

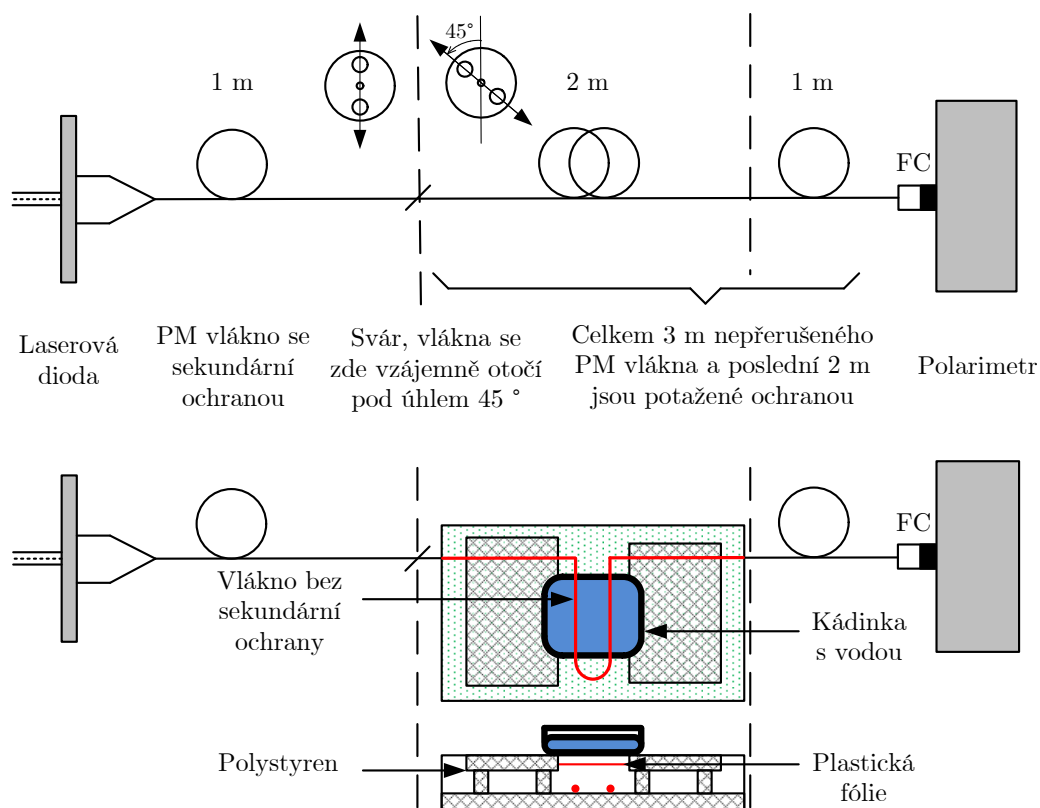
Popis schématického zapojení:

Na začátku použitého zapojení pro měření s polarimetrem je laserová dioda od firmy Thorlabs LPS-PM635, jejíž vlnová délka je 635 nm a vyzařuje vysoce polarizované světlo až 99,9 %. Dioda je napojená na 1 m PM vlákna se sekundární ochranou. Světelný signál je zde vertikálně polarizován v rovině pomalé osy a na výstupu před svárem má stále totožný stav (bod A).

Vlákno dále navazuje svárem (bod B) na velmi citlivé senzorické PM vlákno bez sekundární ochrany o délce 2 m. V místě sváru se nachází důležitá vlastnost zapojení, kdy jsou vlákna v tomto bodě vzájemně pootočena o 45° a poté svařena. Pootočení způsobuje vybuzení pomalé i rychlé osy optického signálu (bod C). Pokud by k tomuto pootočení nedošlo, byl by na výstupu měřen pouze jeden vektor, který by byl ideálně polarizován (vertikálně nebo horizontálně) a výsledek by se neměnil.

Senzorické PM vlákno je umístěno v uzavřené teplotní komoře vyrobené z polystyrenu a plastové fólie. Toto izolované prostředí umožňuje udržet v okolí vlákna stabilní pokojovou teplotu, ale teplota se může začít měnit při přiložení kádinky se studenou nebo teplou vodou nad senzorické vlákno. Takovým vlivem změny teploty

dochází k rozdílům v rychlosti šíření jednotlivých os, které během změn zpomalují nebo zrychlují a světlo se poté šíří neurčitým způsobem polarizace (kruhově, elipticky, náhodně - bod D). Za senzorickým vláknem přímo navazuje vlákno se sekundární ochranou. To je vyvedeno mimo teplotní komoru (bod E). Jeho výstup je přiveden na hlavici polarimetru pomocí FC konektoru, a ta posílá údaje na vyhodnocující polarimetr a poté do připojeného PC (bod F). Pomocí PC lze pozorovat pohyb sledovaného bodu v Poincarého kouli, zjistit stav polarizace SOP, hodnoty Stokesových vektorů a také stupeň polarizovaného světla DOP.

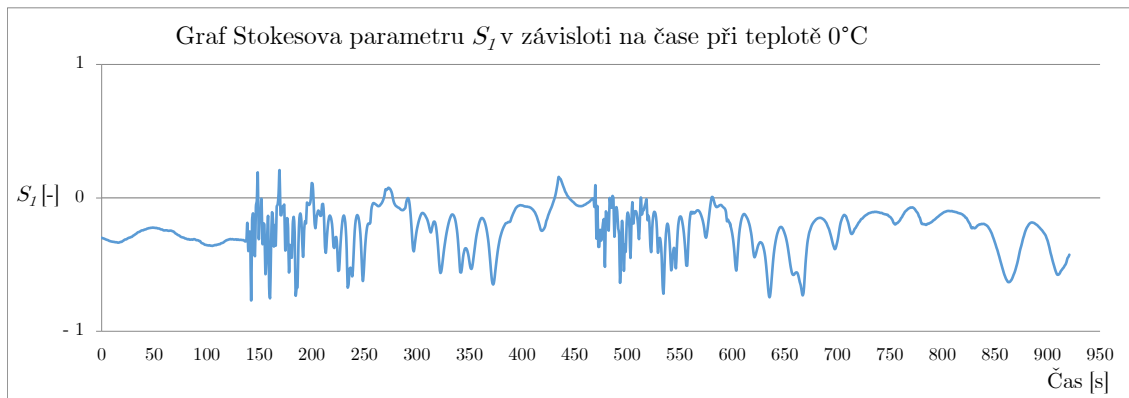


Obr. 3.5: Boční a horní pohled na měřící schéma

3.3 Vynesení výsledků z polarimetru

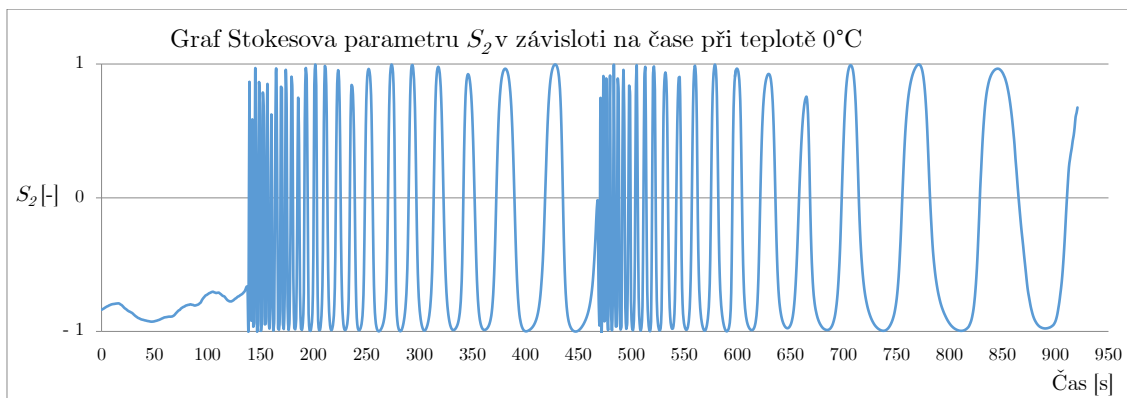
V měření bylo dosaženo výsledků jednotlivých Stokesových vektorů v Poincarého kouli, stupně polarizace a optického výkonu. Všechny výsledky jsou prodiskutovány dále i s příloženými grafickými závislostmi. Pro náměr bylo využito schéma zapojení s polarimetrem (viz 3.4). Celková délka měření dosahovala 920 s a bylo provedeno za laboratorních podmínek při pokojové teplotě 24 °C. Sensorické vlákno bez sekundární ochrany o délce 1 m bylo uschováno v teplotní komoře z polystyrenu a plastické fólie. Mezi vlákem a zdrojem teplotní změny byla vzduchová mezera a teplotní komora byla obalena plastickou folií kvůli izolaci od teplotního proudění. K dosažení teplotní změny sensorického vlákna byla jako teplotní zdroj využita kádinka s ledovou tříští o teplotě 0 °C.

Průběh měření: do optické trasy byl přiveden optický signál pomocí laserové diody s operačním proudem 50 mA. Kádinka s ledovou tříští byla přiložena až v čase 140 s. Do této doby byl sledovaný bod na Poincarého kouli v klidu (v programu na PC) . Zaznamenával jen zanedbatelné změny. Po přiložení kádinky s ledovou tříští nad sensorické vlákno se sledovaný bod dostal do pohybu. Následující grafy popisují pohyb bodu v Poincarého kouli a stupeň polarizovaného světla v průběhu celého měření.



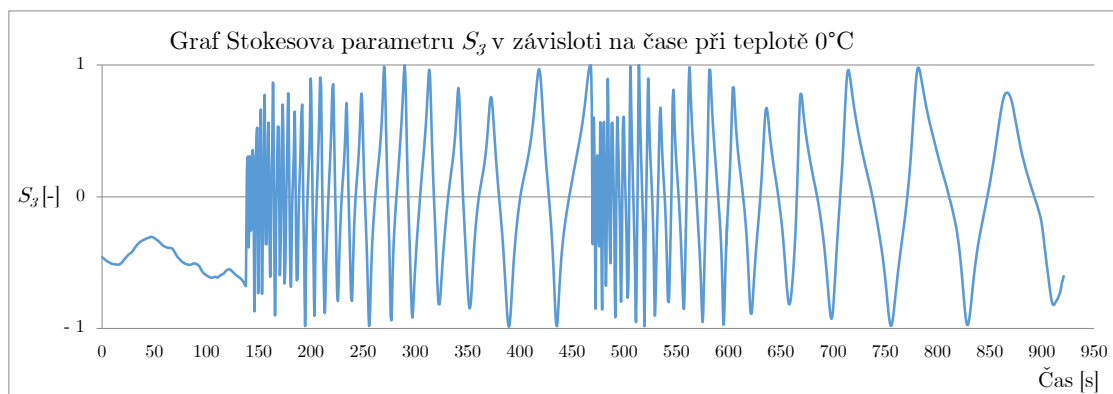
Obr. 3.6: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1

Na grafu (3.6) je znázorněn Stokesův vektor S_1 při pohybu bodu v Poincarého kouli. Na začátku průběhu je bod téměř v klidu až do času 140 s, kdy je nad sensorické vlákno přiložena kádinka s ledovou tříští. V okamžiku přiložení se bod dostal do pohybu a rozkmital se. Lze pozorovat jen malé změny průběhu, které popisují lehké výchylky pohybu bodu od kružnice v rovině vektoru S_1 , proto tyto změny nejsou dotaženy do -1 a +1. Pohybující bod se točí v ose vektoru S_1 .



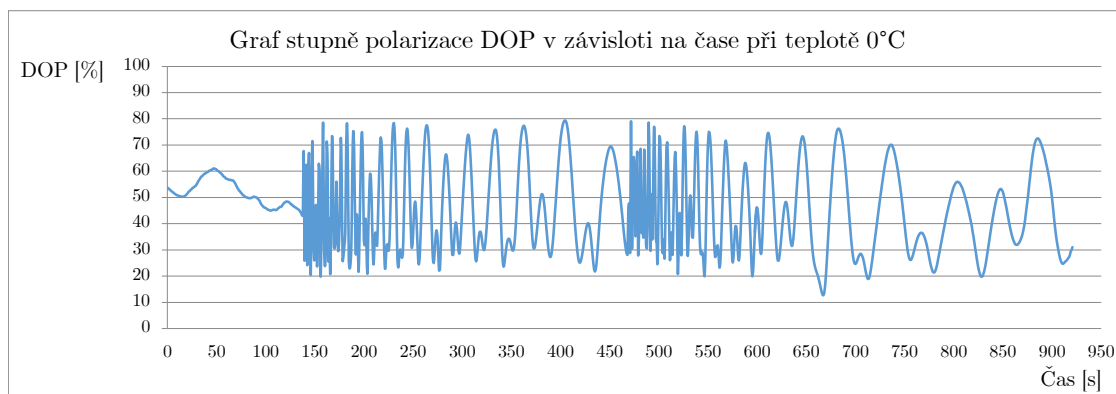
Obr. 3.7: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2

Nejvýznamnějším vektorem z provedeného měření je vektor S_2 (3.7), kdy je na začátku opět možné vidět průběh s drobnými změnami při laboratorní teplotě 24 °C, poté byla přiložena kádinka s teplotou 0 °C a bod v Poincarého kouli se začal pohybovat po neúplné kružnici s lehkými odchylkami. Po přiložení teplotního zdroje se bod začal pohybovat velmi rychle, což je možné vidět z úzkého průběhu signálu. Důvodem proč jednotlivé vzorky nejsou dotaženy úplně do mezí -1 a 1 je takový, že polarimetr měří pouze jeden obrázek za vteřinu. Mohlo by být nastaveno třicet obrázků za vteřinu, avšak tím by se ovšem zkrátilo měření a celý průběh by nebyl vidět. Navazující průběh znázorňuje rozšiřující se impulzy, jelikož dochází k ustálení teploty senzoru. Lze pozorovat zaoblený průběh podobný charakteristice sinus, podle které se dá vyhodnotit, že se jedná o pohyb po kružnici. Z grafu se dá odečíst zhruba dvacet otáček sledovaného bodu. Po odebrání kádinky s tříští v čase 470 s dochází k velmi rychlým změnám v pohybu, kdy je průběh opět velmi úzký a došlo k razantní teplotní změně. Pohybující se bod musí provést stejný počet otáček po kružnici zpět, než se ustálí teplota na senzoru.



Obr. 3.8: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3

U grafu (3.8) je možné vidět podobné chování jako u vektoru S_2 , avšak průběh bodu zde má ostré hrany. Vektor S_3 se nachází v rovině kolmé na vektor S_2 .



Obr. 3.9: Znáznornění stupně polarizace DOP

Zajímavým grafem měření je graf se stupněm polarizace DOP (3.9). DOP se pohybuje v rozmezí od 20 do 80 %. Takové změny lze odůvodnit odrazy světelného signálu, které jsou způsobeny ve sváru a v konektorech. Od každého sváru, konektoru, dokonce i od konektoru samotného polarimetru dochází k odražení světelného signálu zpět ke zdroji, a proto dochází k takovým výkyvům stupně polarizace. Změny stupně polarizace byly ověřeny přidáním 10 cm vlákna s konektory FC, to znamená, že byly přidány další dvě místa, kde se signál bude odrážet. Výsledkem tohoto měření byl pokles stupně polarizace až pod 10 %.

Hlavním cílem měření bylo ověřit teplotní senzor ve formě PM vlákna bez sekundární ochrany. To se podařilo, protože s přiložením kádinky s ledovou tříští bylo možné vidět razantní změny v pohybu bodu vykreslovaného na Poincarého kouli a rovněž změny polarizace vlákna.

4 NÁVRH MĚŘENÍ

V předchozí kapitole měření s polarimetrem bylo dosaženo dobrých výsledků, které potvrdily funkčnost PM vlákna jako vláknového senzoru teploty. Při podrobnějším pohledu na schematické zapojení s polarimetrem (viz 3.4) se došlo k závěru, že zapojení je velmi finančně nákladné. Návrh měření se bude zabývat zmenšením finančních nákladů. Na místo koncového polarimetru bude použita fotodioda, s jejíž pomocí se bude vyhodnocovat elektrický signál na výstupu. V návrhu budou využity doplňující měřicí přístroje, a ty budou informovat o změnách sledovaných parametrů senzorického vlákna.

4.1 Navrhované komponenty

4.1.1 Fotodioda

Pro snímání optického záření bude použita velmi rychlá křemíková (Si) fotodioda FDS02 od firmy Thorlabs. Fotodioda pracuje na vlnových délkách 400–1100 nm, má velmi rychlou dobu náběhu 47 ps a její aktivní snímací plocha je 0,25 mm. Operační teplotní oblast je -40 až 100 °C. Na fotodiodě bude měřen proud v závěrném směru a do optické trasy bude připojena pomocí FC konektoru.

4.1.2 Přípravek pro vybuzení os

Přípravek je zde určen pro vybuzení obou os optického signálu, to znamená pomalé a rychlé osy. Díky vybuzení obou os bude umožněno snímat optický výkon na fotodiodě mezi osami. Prakticky se skládá ze dvou FC konektorů a krátkého PM vlákna, kde jsou výstupy konektorů jsou vzájemně pootočený speciální technikou výroby. Na jednom konektoru je úhel pootočení roven 0° a druhý konektor má výstup pootočený o 45°, tím bude docíleno požadovaného vybuzení obou os.

4.1.3 Měřič výkonu a multimetr

Měření výkonu bude prováděno pomocí měřiče světelného výkonu ČSA V, který měří proud v Ampérech, ale přístroj je zkalibrován a na analogové stupnici ukazuje hodnotu výkonu ve Wattech. Digitalizaci tohoto měření bude provádět multimetr Agilent 34450A napojen pomocí kabelů a svorek na měřič výkonu. Multimetr následně vyhodnotí napětí každého změřeného vzorku.

4.1.4 Lineární polarizátor

Pro účely měření byl zvolen vertikální lineární polarizátor proto, aby bylo možné snímat výkon na fotodiodě mezi osami (pomalá a rychlá osa pootočená o 45°).

4.1.5 Dělič výkonu zachovávající polarizaci

Pro zkontrolování správnosti měření na fotodiodě by bylo vhodné ještě před fotodiodu vložit výkonový dělič zachovávající polarizaci 90:10. Na vstup děliče bude přiveden optický signál a ten bude v PM vláknečně rozdělen výkonově na 90 % pro fotodiodu a 10 % pro polarimetr. Polarimetr bude sloužit jako kontrola průběhu z fotodiody a také pro srovnání zpracovaných grafů. Rozdělení děličem výkonu by mělo způsobit pouze zmenšení výstupního výkonu, polarizace by měla být zachována a na výstupu za fotodiodou a polarimetrem by teoreticky měl být viděn podobný průběh.



Obr. 4.1: Polarizační dělič výkonu

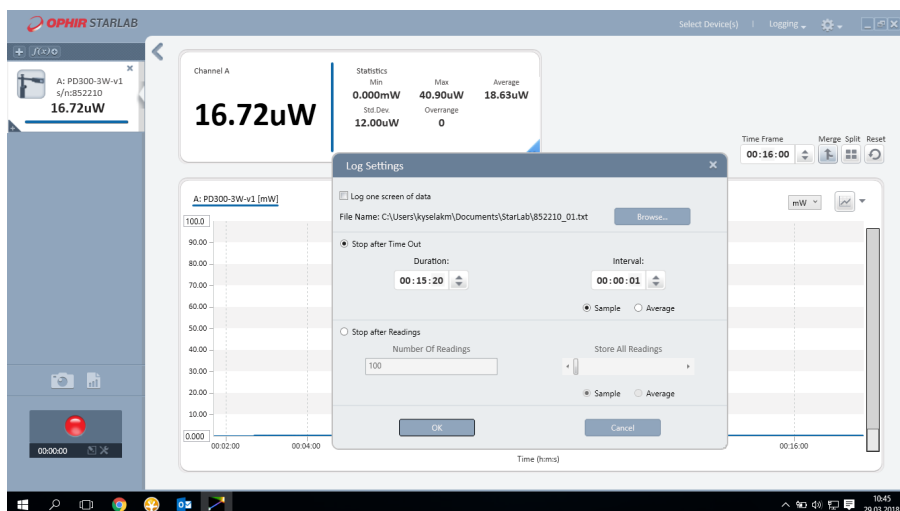
4.1.6 Měřic optického výkonu VEGA

Dalším navrhovaným měřicím přístrojem pro získání dat z optické trasy je přístroj VEGA P/N 7Z01560, který pomocí snímací hlavice PD300 vyhodnocuje přijatý optický výkon.



Obr. 4.2: Měřic optického výkonu VEGA, převzato z <http://bit.ly/2ITdEAP>

Měření optického výkonu bude prováděno pomocí obslužného programu OPHIR Starlab (viz 4.3), který je intuitivní a postačí pouze nastavení základních parametrů měření jako například: dobu měření, periodu vzorkování a název výstupního textového souboru.



Obr. 4.3: Prostředí programu OPHIR Starlab

4.1.7 Spektrální analyzátor

Součástí zadání je také velmi přesné měření vlnové délky. K tomuto měření bude využit spektrální analyzátor HR2000+ od firmy Ocean Optics. Přístroj je speciálně vyroben pro velmi přesné měření vlnových délek v rozmezí 603–656 nm a na tyto hodnoty je zkalibrován s minimální odchylkou (viz tabulka 4.1).

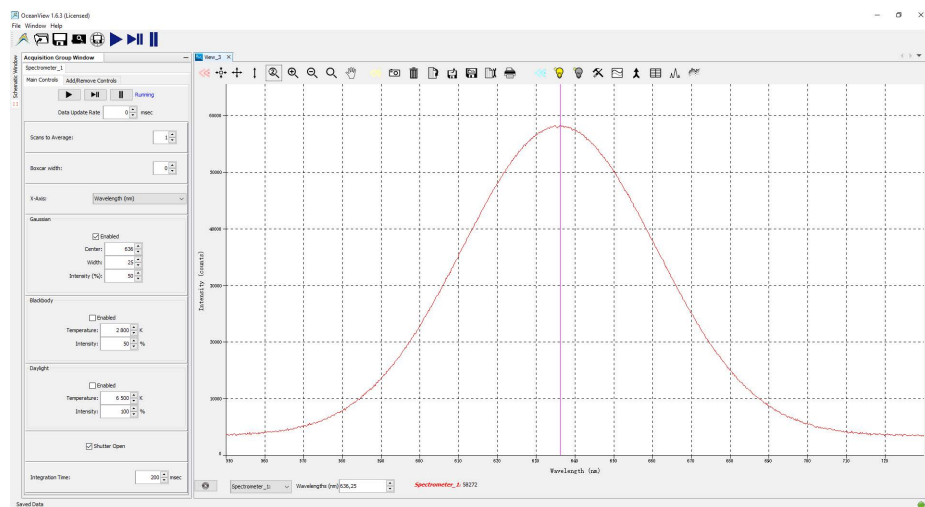
Tab. 4.1: Tabulka kalibrace spektrálního analyzátoru

λ	Rozlišení v pixelech	Předpokládaná λ	$\Delta\lambda$
602,999	31	602,994	0,005
609,616	231	609,624	-0,008
614,306	378	614,308	-0,002
621,728	622	621,730	-0,002
626,649	792	626,640	0,009
633,443	1041	633,444	-0,001
640,225	1308	640,226	-0,001
650,653	1798	650,661	-0,008
653,288	1896	653,282	0,006

Spektrální analyzátor bude do optické trasy připojen přímo na výstup optické trasy a s PC bude propojen pomocí USB kabelu. Nastavení parametrů měření bude provedeno v programu OceanView (viz 4.5).



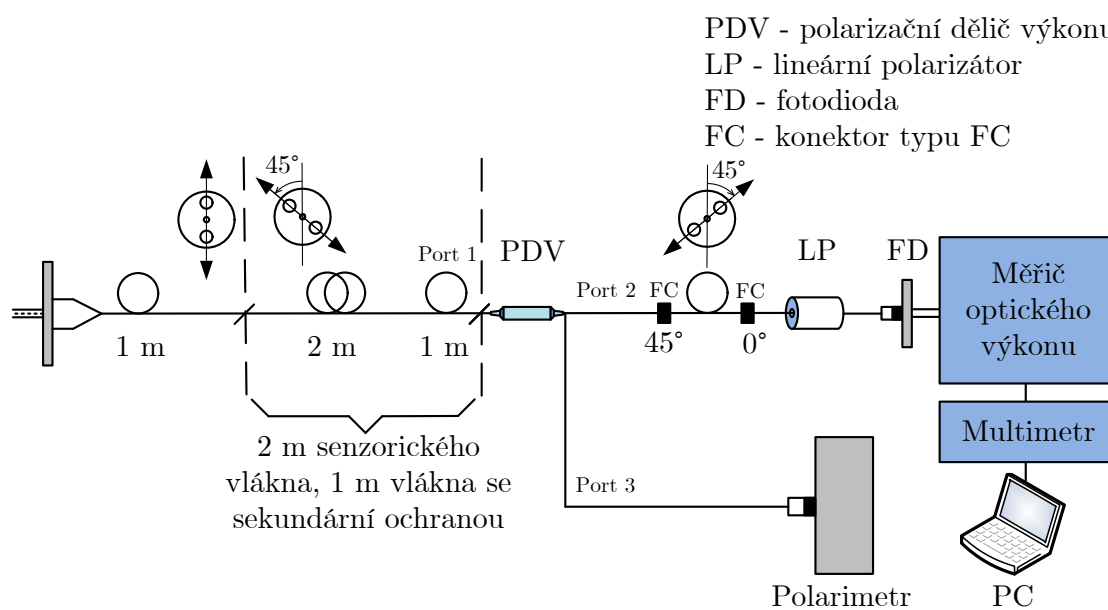
Obr. 4.4: Spektrální anylátor HR2000+, převzato z <http://bit.ly/2J1PkwK>



Obr. 4.5: Vzhled pracovní prostředí programu OceanView

4.2 Návrh zapojení s fotodiodou

V předchozí kapitole bylo pomocí polarimetru ověřeno, že při změně teploty dochází ke změně pohybu bodu na Poincarého kouli a zároveň ke změně polarizace. Jelikož je zapojení s polarimetrem finančně nákladné a je vhodné hlavně pro laboratorní použití, je navrženo zapojení s fotodioudou, která bude sloužit k měření výstupního optického výkonu.



Obr. 4.6: Schématické zapojení s děličem výkonu zachovávajícím polarizaci

Popis schématického zapojení:

Zdrojem signálu je laserová dioda Thorlabs LPS-PM635 o vlnové délce 635 nm s vysoce polarizovaným světlem, následuje 1 m PM vlákna se sekundární ochranou. Světlo se zde šíří ve vertikální ose. Za vláknem se sekundární ochranou přímo navazuje senzorické vlákno napojené svárem a nachází se v izolované teplotní komoře z polystyrenu a plastické fólie pro zamezení proudění vzduchu a tudíž i okolních teplotních vlivů na měřené senzorické vlákno. Zmíněný svár má charakteristickou vlastnost zapojení, kdy obě vlákna jsou proti sobě vzájemně pootočená o 45°, tím dojde k vybudování pomalé i rychlé osy signálu. Díky pootočení os se stává senzorické vlákno citlivější na změny teploty. Optická trasa dále pokračuje ven z teplotní komory vláknem se sekundární ochranou, jež je přivedeno na Port 1 děliče výkonu. Dělič výkonu rozděluje signál do dvou výstupních portů (Port 2, Port 3).

Ve znázorněném zapojení je 90 % světelného výkonu z Portu 2 přivedeno nejprve na přípravek pro vybudování os s pootočeným konektorem o 45°. Díky této komponentě bude možné sledovat výkon mezi těmito osami, což je cílem. V případě nezařazení tohoto prvku do zapojení, byl by snímán pouze výkon ve vertikální ose a teoreticky by

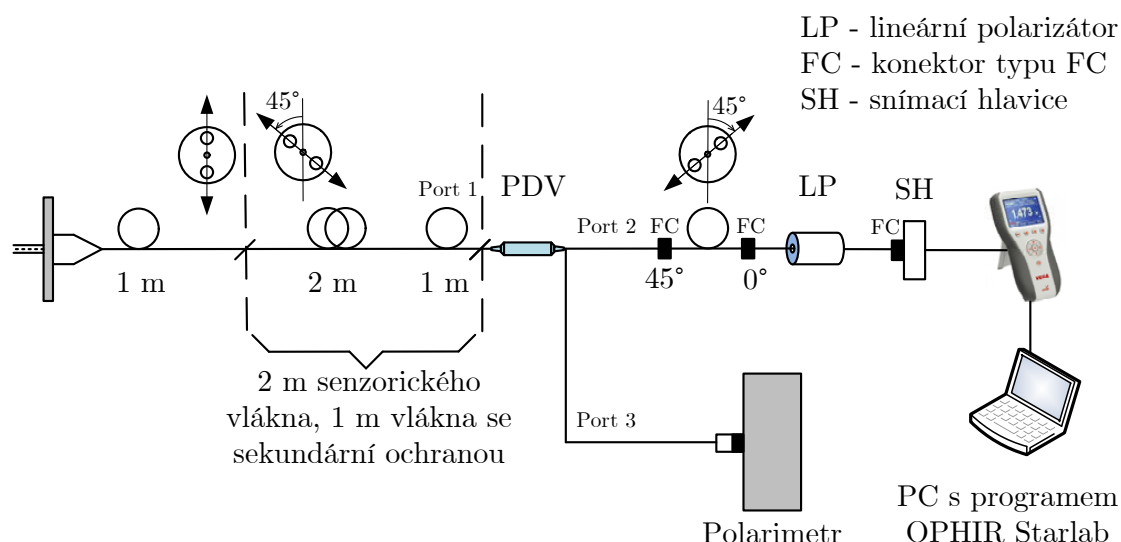
zaznamenával jen malé změny výkonu. Následuje lineární polarizátor, který zaručí snímání výkonu právě mezi osami na fotodiodě. Fotodioda měří proud v závěrném směru a její výstup je přiveden na měřič optického výkonu, z něj pak dále na multimetr, který převádí proud na napětí. Následuje PC, v němž jsou data zapisována do excelu a následně vynesena do grafů.

Poslední částí zapojení je připojení polarimetru na Port 3, který má na výstupu 10 % světelného výkonu. Polarimetr v tomto zapojení slouží k porovnání výsledných grafů s fotodiodou. Pro další měření by se následně prohodily Porty 2 a 3, aby bylo možné srovnat jednotlivé výsledky a zhodnotit funkčnost fotodiody.

Celkové schéma zapojení je navrženo složitěji na použité komponenty. Důvodem pro takovéto zapojení je nutnost dokázat změny naměřených hodnot po přiložení teplotního vlivu nad senzorické vlákno.

4.3 Návrh měření s měřičem optického výkonu VEGA

Dalším návrhem měření pro srovnávání vlastností teplotního senzoru je měření pomocí měřiče optického výkonu VEGA P/N 7Z01560. Tento měřicí přístroj umožňuje přímo měřit dodávaný optický výkon, který je z optické trasy přiveden na snímací hlavici PD300 pomocí FC konektoru. Díky propojení s PC pomocí USB kabelu lze v programu OPHIR Starlab nastavit parametry měření. Získané naměřené hodnoty se zapisují do textového souboru, který je dále zpracován. Následuje zapojení s tímto měřicím přístrojem.



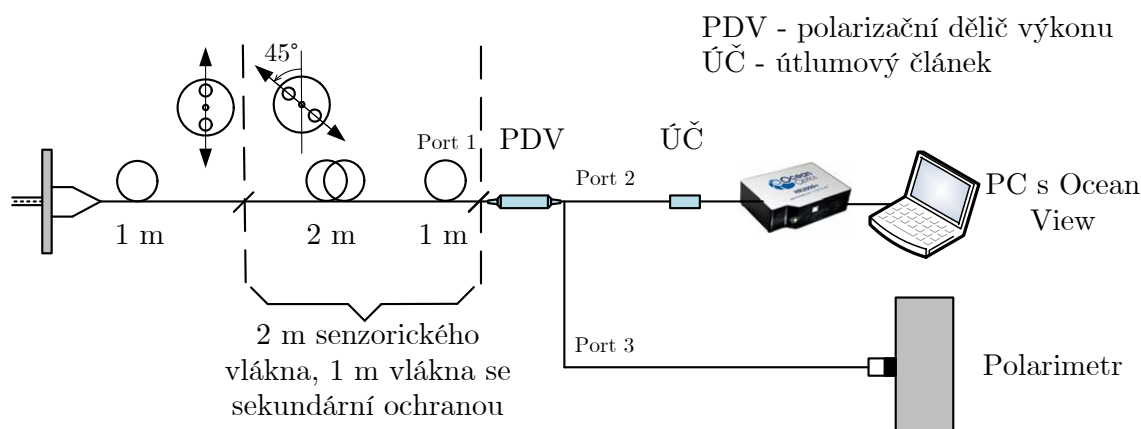
Obr. 4.7: Schématické zapojení s měřicím přístrojem optického výkonu VEGA

Popis schématického zapojení:

Schematické zapojení začíná shodně jako u měření s výkonovým děličem a fotodi-
odou (viz 4.6). Za děličem výkonu zachovávajícím polarizaci je však na Port 2 (90 %
výkonu optického trasy) napojen přípravek pro vybuzení os, dále lineární polari-
zátor a za ním velmi důležitá součást tohoto měření, a to snímací hlavice PD300.
Snímací hlavice je propojena s měřícím přístrojem VEGA P/N 7Z01560 (viz 4.2),
který vyhodnocuje snímaný optický signál a zaznamenává každou vteřinu změřený
optický výkon pomocí programu OPHIR Starlab (viz 4.3). Port 3 (10 % výkonu op-
tického trasy) je vyveden na polarimetr, který zde bude opět sloužit k porovnání
a ověřování výsledků měření.

4.4 Návrh na přesné měření vlnové délky

Dalším bodem zadání práce je návrh velmi přesného měření vlnové délky, které
umožní získat potřebné informace o nelineárních jevech v optickém vlákně. Pro mě-
ření spektra bude využit spektrální analyzátor HR2000+ od firmy Ocean Optics.



Obr. 4.8: Schématické zapojení se spektrálním analyzátozem

Popis schématického zapojení:

Jak lze vidět, schématické zapojení je navrženo podobně jako zapojení s foto-
diou (viz 4.6). Po dělič výkonu zachovávající polarizaci je zapojení neměnné, avšak
výstup Portu 2 (90 % výkonu optického trasy) je přiveden na dodatečný útlumový
článek (-10 dBm) a poté do spektrálního analyzátoru. Útlumový článek je zde vlo-
žen proto, aby nebyl analyzátor přesvícen výkonem z optické trasy. Jeho vložením
není výsledné měření nijak zvlášť ovlivněno. Spektrální analyzátor je propojen s PC
pomocí USB konektoru. Připojeným PC lze v programu OceanView nastavit para-
metry měření. Druhý výstup děliče výkonu - Port 3 je vyveden na polarimetr a slouží
k ověření funkčnosti měření.

5 REALIZACE NÁVRHŮ MĚŘENÍ

Zmíněná kapitola se věnuje realizacím navrhovaných řešení, zpracováním výsledků a grafických závislostí. Všechna provedená měření měla stejné vstupní parametry a naplánovaný průběh měření (viz 5.1).

Tab. 5.1: Základní parametry pro realizovaná měření

Teplota laboratoře	24 °C
Délka měření	920 s
Čas přiložení kádinky s ledovou tříští - 0 °C	140 s
Čas odebrání kádinky s ledovou tříští - 0 °C	470 s

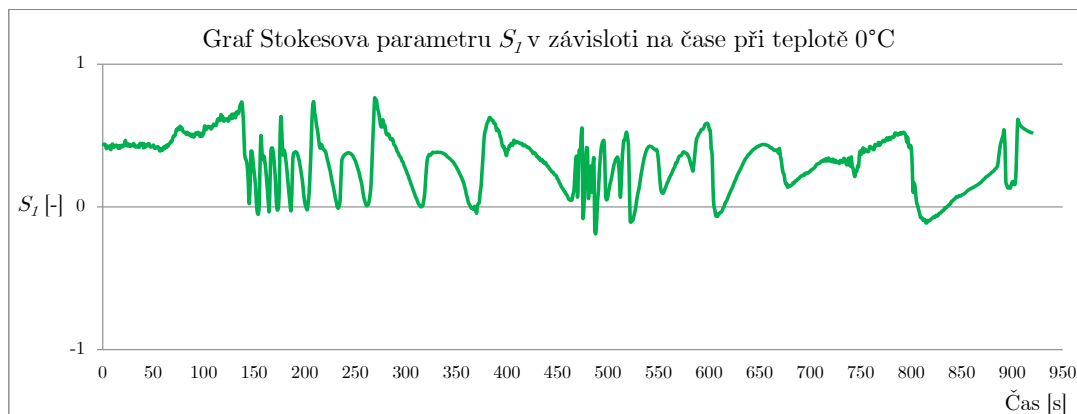
5.1 Měření s děličem výkonu zachovávajícím polarizaci

Prvním z realizovaných měření bylo měření s použitím děliče výkonu zachovávajícím polarizaci s poměrem 90:10 (viz schématické zapojení 4.6). Jeho funkce spočívala v rozdělení světelného výkonu, který prošel senzorickým vláknem na 90 a 10 % do dvou výstupních portů. S děličem výkonu byla provedena dvě měření, kdy v prvním měření bylo přivedeno 90 % výkonu na fotodiodu a 10 % výkonu na polarimetr. Pomocí polarimetru byly získány srovnávací grafy změn. Ve druhém měření byly výstupní porty děliče vzájemně zaměněny.

5.1.1 Rozdělení výkonu: polarimetr 10 %, fotodioda 90 %

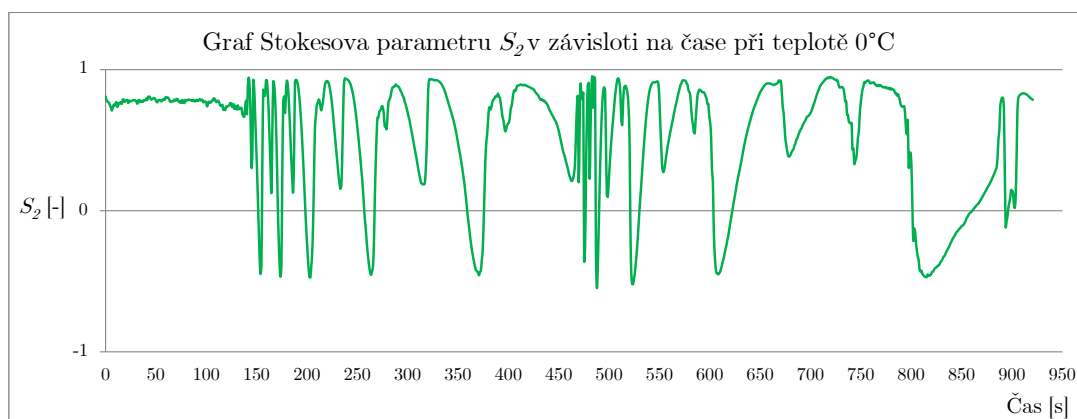
U prvního zmíněného grafu Stokesova vektoru S_1 (viz 5.1) lze na počátku měření pozorovat pouze malé změny sledovaného bodu v Poincarého kouli, ale po přiložení kádinky s ledovou tříští v čase 140 s dochází k rychlým změnám s úzkým průběhem. Postupně se průběh začíná rozšiřovat a tím se ustaluje teplota na senzorickém vlákně. V čase 470 s je kádinka s ledovou tříští odebrána a opět dochází k rychlým změnám, ale bod se nyní pohybuje v opačném směru. Z grafu lze pozorovat zrcadlovou podobnost průběhu. Průběh se dále rozšiřuje a přibližuje se zpět k počáteční laboratorní teplotě.

Změny průběhu v tomto grafu nejsou dotaženy k hraničním bodům 1 až -1, protože se bod pohyboval primárně v jiném vektoru, jak je možné vidět na dalších grafech. Zde jsou tedy znázorněny pouze odchylky pohybu sledovaného bodu od neúplné kružnice.



Obr. 5.1: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1

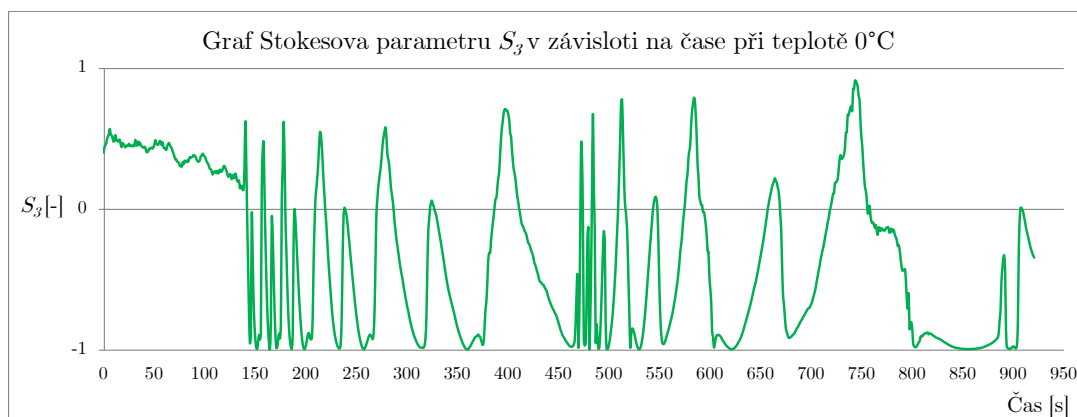
Graf Stokesova vektoru S_2 (viz 5.2) zobrazuje větší změny v pohybu sledovaného bodu a také přiblížení se pohybu po kružnici zejména v jedné polovině Poincarého koule (směřováno k +1 na y -lonové ose grafu). Opět je vidět, že sledovaný bod byl na začátku v klidu a po přiložení kádinky (140 s) došlo k výrazným a rychlým změnám průběhu bodu na Poincarého kouli. Po ustálení a roztažení signálu (pomalý pohyb bodu v kouli) došlo k odebrání kádinky a bod se opačným směrem vracel do původního stavu. Při podrobnějším pohledu lze vidět zrcadlení průběhu.



Obr. 5.2: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2

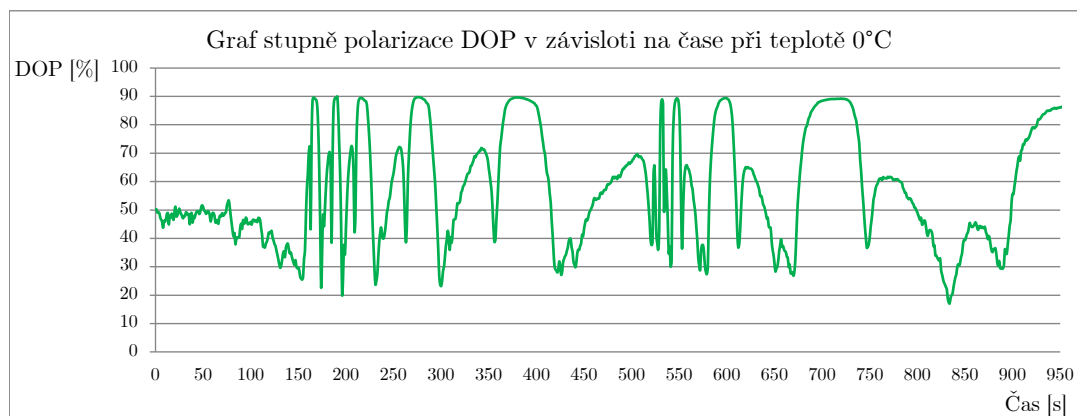
Průběh posledního Stokesova vektoru S_3 (5.3) začíná podobně jako dva předešlé. Nyní se průběh pohybuje více v druhé polovině koule, kde dotahuje střídavě k -1 na ose y . Průběh sledovaného bodu ve vektoru S_3 má ostřejší přechody ve vrcholech,

to je známka toho, že průběh neopisuje úplnou kružnici, ale něco, co se kružnici pouze podobá. Z průběhu jde znova zřetelně vidět změny po přiložení a odejmutí kádinky, kdy je průběh výrazně užší.



Obr. 5.3: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3

Posledním grafem získaným pomocí měření na polarimetru je stupeň polarizace DOP. Na zmíněném grafu (viz 5.4) dochází k velkým změnám polarizovaného světla optické trasy od 20 po 90 %. Výkyvy průběhu mohou být odůvodněny vlivem měnící se teploty i počtem použitých optických spojek a konektorů. Jelikož každá spojka a konektor do optické trasy vnáší odrazy, ty se pak vrací k laserovému zdroji a přináší tak do trasy méně polarizované světlo.

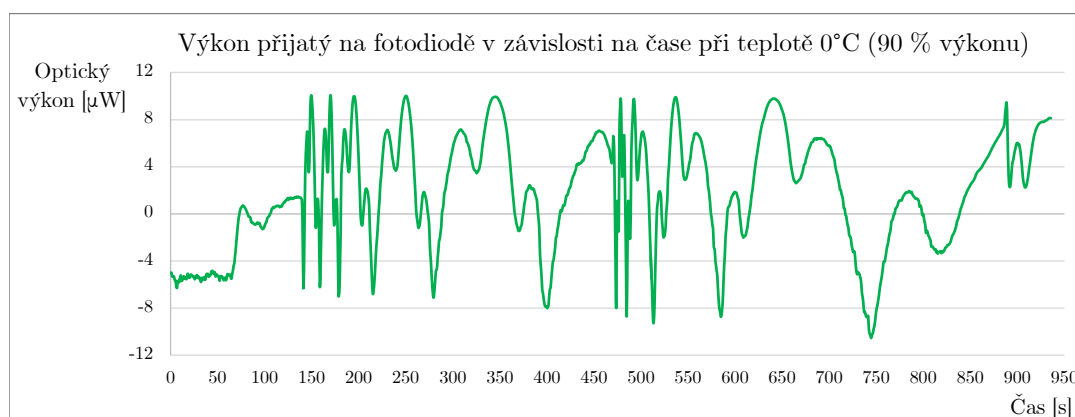


Obr. 5.4: Znázornění stupně polarizace DOP

Vynesené grafy jednotlivých Stokesových parametrů S_1 , S_2 , S_3 získané polarimetrem nejsou tak přesné a dotažené k hraničním bodům -1 a +1 Poincarého koule jako u prvního měření na polarimetru v kapitole 3. Tuhle skutečnost však lze jednoduše odůvodnit, a to tím, že z děliče optického výkonu bylo pro polarimetr dodáváno pouze 10 % výkonu z optické trasy. Tímto vlivem jsou naměřené výsledky mírně

zkresleny. Nicméně, tyto odchylky jsou pro účely měření zanedbatelné. I navzdory nim totiž byly jednoznačně prokázány a ověřeny vlastnosti zapojení při změně teploty na senzorickém vlákně.

Prakticky nejdůležitějším grafem získaným ze všech měření je graf výkonu na fotodiodě (viz 5.5). Na fotodiodu bylo přiváděno 90 % světelného signálu z optické trasy. Po zavedení přípravku pro pootočení o 45° a lineárního polarizátoru do zapojení bylo docíleno snímání optického výkonu mezi osami, a tudíž bylo možné sledovat změny průběhu na senzorickém vlákně. Pokud by k pootočení nedošlo, změny výkonu by stále bylo možné měřit, ale měnil by se pouze v malém rozsahu, protože by byl brán pouze z vertikální osy (pomalé osy).



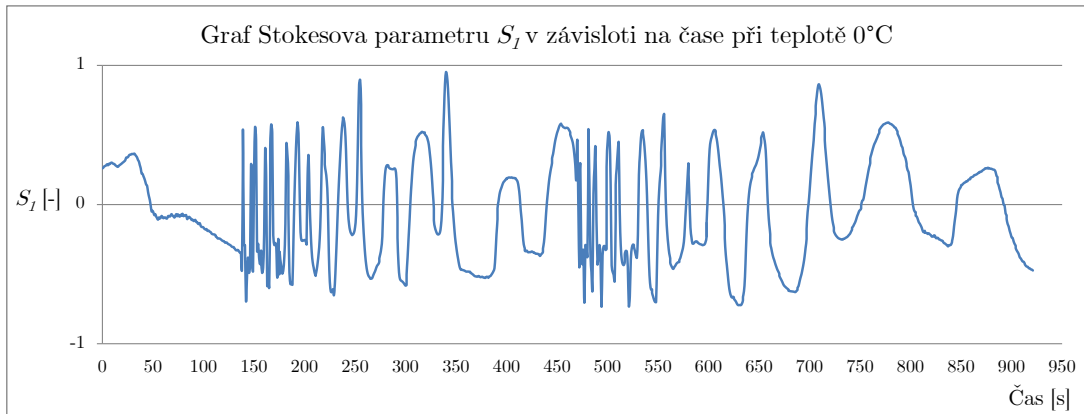
Obr. 5.5: Optický výkon snímáný fotodiou převedený na napětí při 90 % výkonu

Začátek měřeného průběhu je vcelku klidný s jedním menším skokem, který mohl být způsoben pohybem vlákna. Avšak v době přiložení kádinky s ledovou tříští dojde k rychlým změnám s velmi úzkou šířkou signálu a na měřiči světelného výkonu bylo možné pozorovat, jak se ručička pohybuje zleva doprava. Jakmile se senzorické vlákno dostává blíže k teplotě ledové tříště dochází k roztažení signálu. Na průběhu lze vidět interval se třemi různými vrcholy, které se postupně opakují a roztahují až do doby odebrání kádinky. Signál je po odebrání kádinky zrcadlově otočený, po rychlých změnách se však více roztahuje. To znázorňuje pomalejší přizpůsobení se laboratorní teplotě. Průběh přijatého signálu na fotodiodě je hladký a zaoblený.

5.1.2 Rozdělení výkonu: polarimetr 90 %, fotodioda 10 %

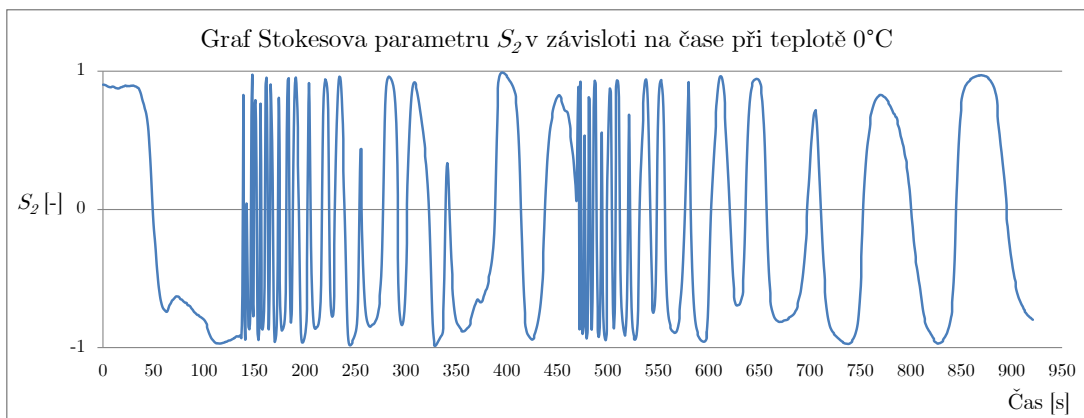
Druhé měření a jeho zapojení s fotodiodou je prakticky identické jako v předešlém zapojení (viz 4.6), pouze došlo k prohození výstupních Portů 2 a 3 u děliče optického výkonu. V této části bylo na fotodiodu přiváděno pouze 10 % celkového výkonu a zbylých 90 % bylo přiváděno na polarimetr.

Přiložený graf vektoru S_1 (5.6) vykazuje pouze malé odchylky sledovaného bodu od pohybu po kružnici a z toho plyne, že kruhový pohyb primárně nebyl v tomto vektoru. Lze z něj však pozorovat změny po přiložení a odebrání kádinky.



Obr. 5.6: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_1

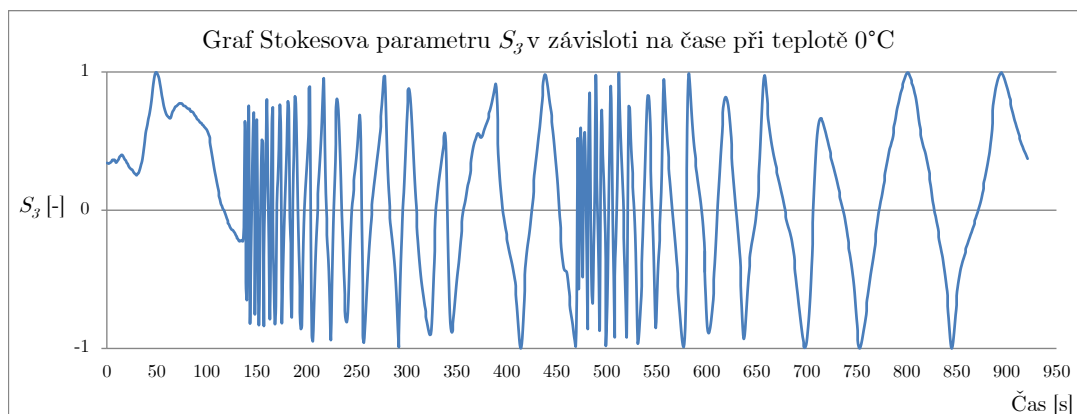
Důležitým grafem je Stokesův vektor S_2 (5.6), jenž znázorňuje již velmi důvěryhodný pohyb po neúplné kružnici v ose vektoru S_2 . Lze to pozorovat podle zaoblených vrcholů průběhu. Před přiložením kádinky došlo ke skoku, ale ten mohl být způsobený pohybem v laboratoři nebo nad senzorickým vláknem. To však dále příliš nevadí, protože ve chvíli přiložení kádinky s ledovou tříští došlo k pravidelným a rychlým změnám sledovaného bodu v Poincarého kouli.



Obr. 5.7: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2

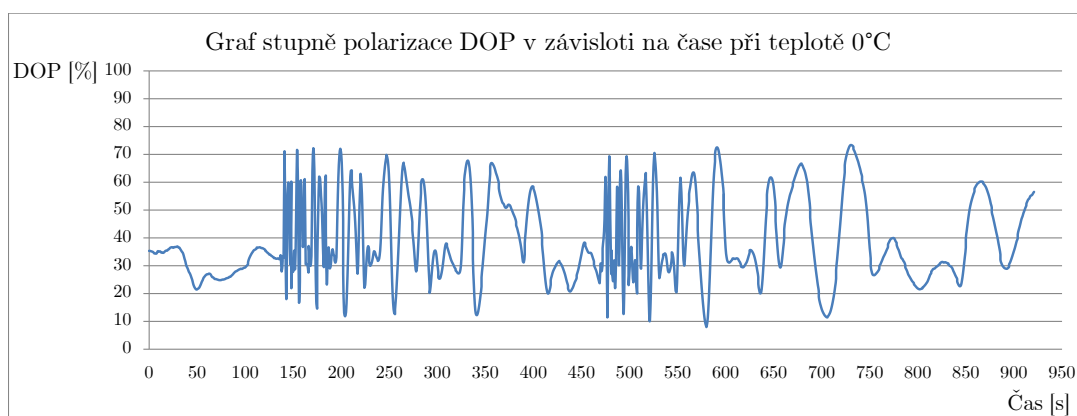
S dodávaným výkonem 90 % z optické trasy je průběh téměř pravidelně dotažen k hraničním bodům $+1$ a -1 , avšak v časech 260 a 340 s se nejspíš projeví vlivy zapojení nebo pohyb v místnosti. V těchto časech nedošlo k dotažení průběhu signálu k $+1$.

Odebrání kádinky rozpohybovalo bod v opačném směru a signál se postupně roztahoval. Sledovaný bod obíhal Poincarého kouli po neúplné kružnici.



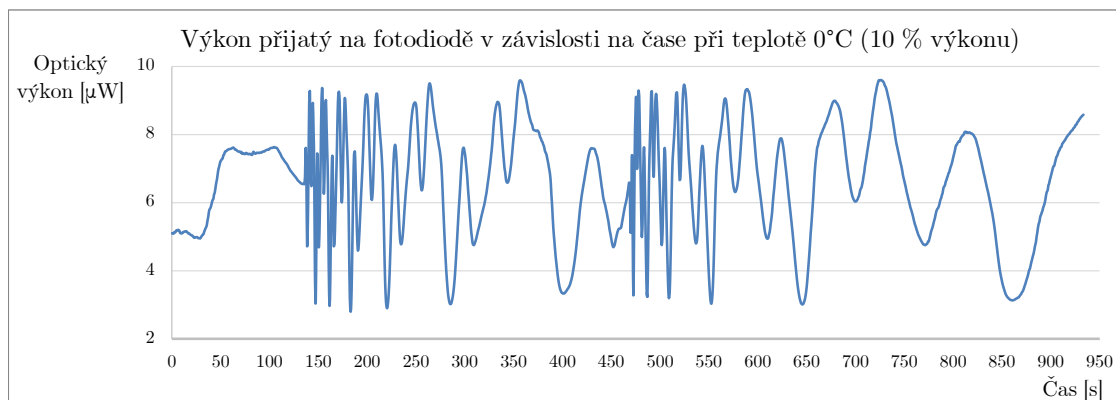
Obr. 5.8: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_3

Stokesův vektor S_3 má ostřejší přechody ve vrcholech a díky tomu lze konstatovat, že vektor S_3 není primární vektorem, ve kterém se sledovaný bod pohybuje. Na začátku průběhu došlo ve fázi klidu ke skoku, ale přiložení kádinky se poté projevilo, jak bylo předpokládáno. Následoval velmi úzký průběh signálu s ostrými vrcholy. Po ustalování teploty na optickém senzoru se průběh začal roztahovat a po odebrání kádinky došlo k přesnému opaku. Nejprve tedy úzký průběh, který se však postupně roztahoval.



Obr. 5.9: Znázornění stupně polarizace DOP

Pomocí grafu stupně polarizace DOP (viz 5.9), byly zjištěny změny DOP v rozmezí od 10 % až do 75 %. Odůvodnit to lze například pohybem s měřeními vlákny při rozpojování zapojení, optickými spojkami nebo nepatrnou změnou okolních vlivů, což následně mohlo vyvolat větší ztráty DOP.



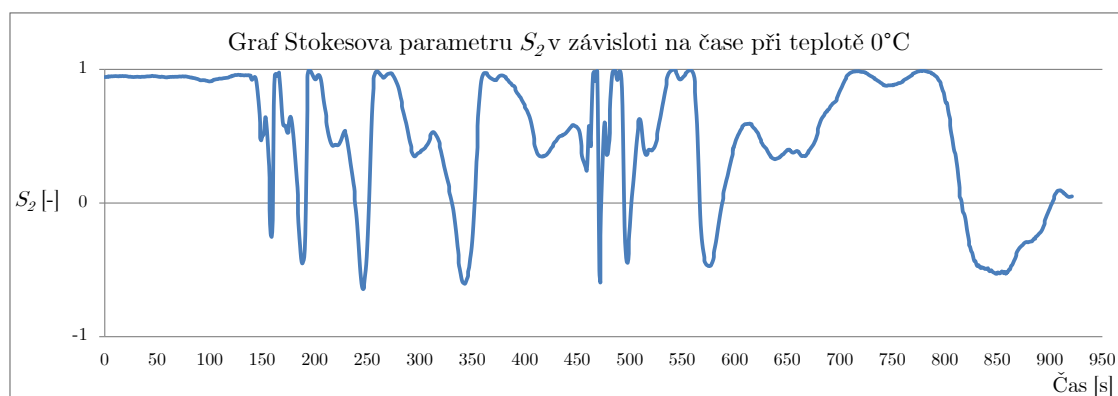
Obr. 5.10: Optický výkon snímáný fotodiou převedený na napětí při 10 % výkonu

Při dodaném výkonu 10 % z optické trasy lze opět potvrdit funkčnost fotodiody i s tímto malým výkonem. Rozmezí naměřeného optického výkonu se pohybovalo od 2 do 10 μW . V průběhu je možné zaznamenat pravidelnost intervalů, které jsou znázorněny od 180 do 220 s a poté hned od 220 do 290 s. Druhý zmíněný rozsah je pouze roztažen s ustalující se teplotou na senzoru. Oba zmíněné průběhy mají tři postupně se zvyšující vrcholy. Po odebrání kádinky se signál více roztáhl, ale tři vrcholy lze opět pozorovat, avšak v zrcadlově otočeném průběhu.

5.2 Měření na přístroji VEGA

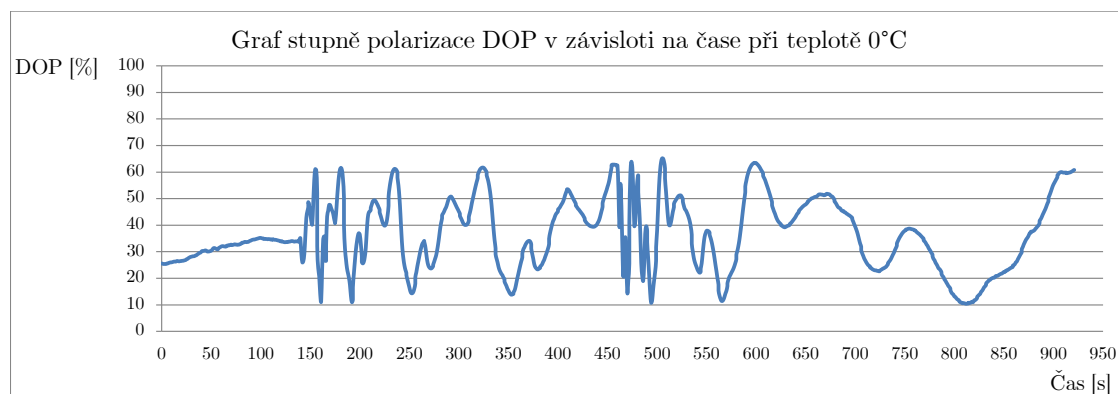
5.2.1 Vynesení výsledků z polarimetru

V následující části jsou zobrazeny grafy Stokesova vektoru S_2 a stupeň polarizace DOP. Jejich výsledné charakteristiky jsou velmi zkreslené tím, že na polarimetr bylo dodáváno pouze 10 % výkonu optické trasy. Většina měření byla prováděna na polarimetru a z důvodu podobných průběhů u Stokesových vektorů S_1 a S_3 jsou tyto grafy dále vynechány. Nejdůležitějším grafem změřeným na polarimetru je Stokesův vektor S_2 .



Obr. 5.11: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2

U průběhu grafu Stokesova vektoru S_2 (viz 5.11) sledovaný bod dotahuje spíše k hranici +1. To lze vysvětlit pohybem bodu v jiné rovině Poincarého koule. Po přiložení kádinky v čase 140s dochází k pohybu sledovaného bodu v pravidelně se opakujících se intervalech a následné odejmutí v čase 470s způsobí dva úzké průběhy a poté dva zrcadlově otočené a roztažené průběhy.



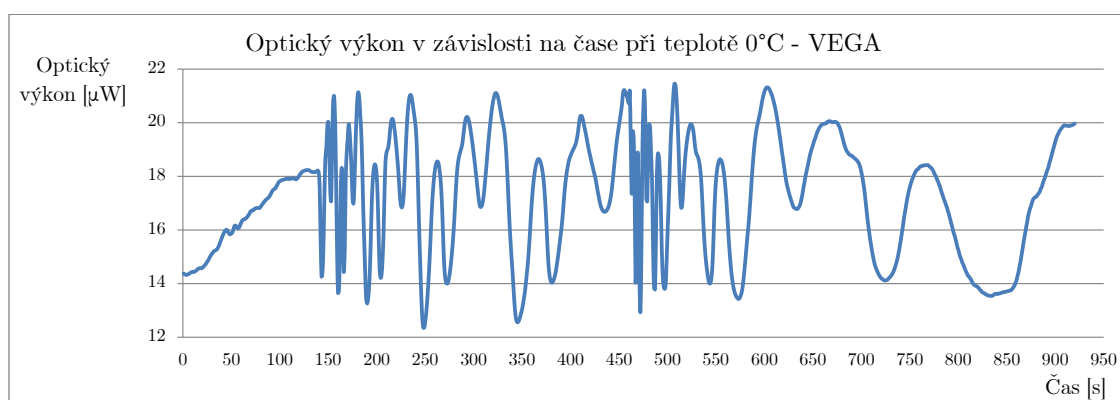
Obr. 5.12: Znázornění stupně polarizace DOP

Zajímavým grafem je stupeň polarizace DOP, kdy se křivka pohybovala v rozmezí hodnot od 10 do 65 % DOP. Hodnota DOP byla ovlivněna dodávaným výkonem z optické trasy a také množstvím spojek na trase.

Ihned po přiložení kádinky začal průběh vykreslovat tři postupně se zvedající vrcholky v jednom intervalu a tento interval se dále s ustalováním teploty pouze rozšiřoval. Po odejmutí kádinky došlo k zrcadlení předešlých intervalů a do konce měření byly vykresleny dva zrcadlové intervaly s větší šířkou.

5.2.2 Vynesení výsledků z měřiče VEGA

Na měřič optického výkonu VEGA bylo z optické trasy přiváděno 90 % světelného výkonu optické trasy.



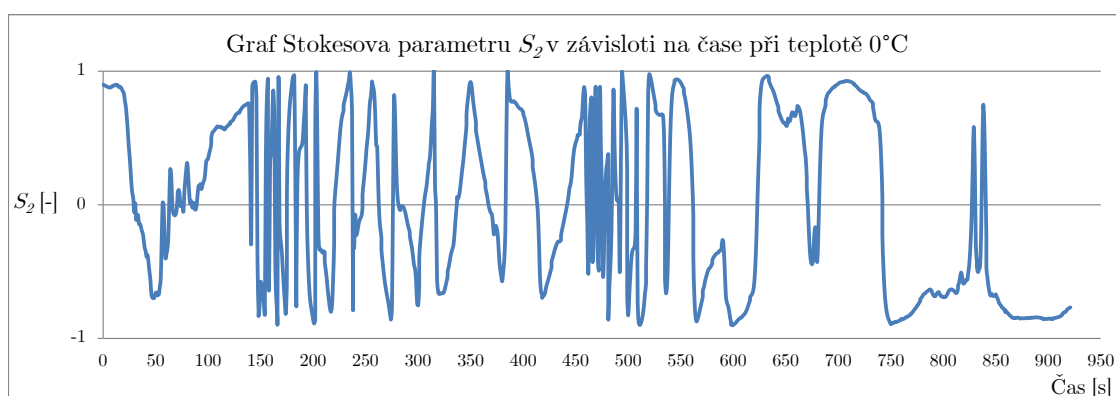
Obr. 5.13: Optický výkon změřený měřícím přístrojem VEGA

Výsledný graf nejprve v počátku nebyl úplně v klidu, ale pozvolna se výkon zvedal až o 4 μW . S přiložením kádinky došlo k rychlým změnám optického výkonu, který se měnil od 13 do 21 μW . Po dvou velmi úzkých průbězích následují tři velmi podobné průběhy se třemi vrcholky. Postupně se tyto průběhy roztahují až do chvíle odebrání kádinky. Poté se opakují rychlé změny a dva zrcadlově otočené průběhy.

5.3 Měření na spektrálním analyzátoru

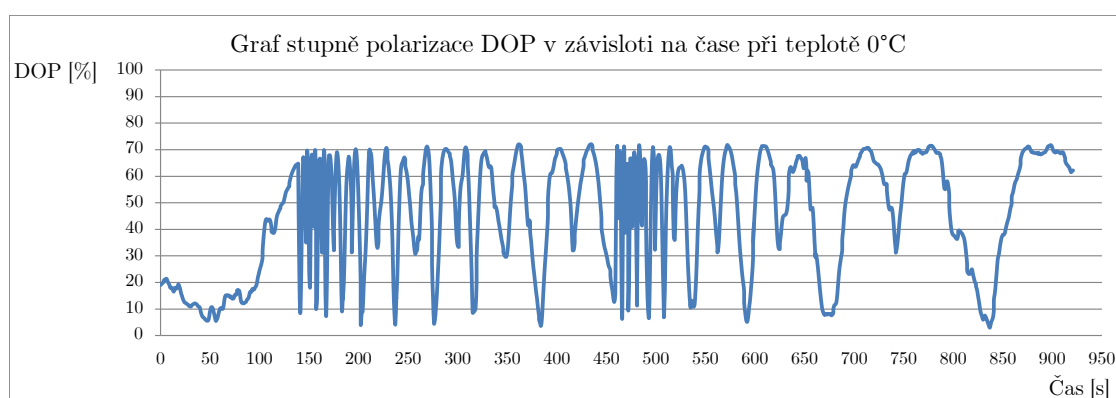
Poslední část praktického měření se bude zabývat velmi přesným měřením vlnové délky při průběhu optického signálu skrz vláknový senzor. Měření na spektrálním analyzátoru bylo prováděno na jedné vlnové délce $\lambda = 635,1 \text{ nm}$, která byla vybrána jako vhodná pro měření. V této vlnové délce byla měřena intenzita světla. Grafy Stokesových vektorů S_1 a S_3 z měření na polarimetru jsou opět vynechány.

5.3.1 Vynesení výsledků z polarimetru



Obr. 5.14: Znázornění pohybu bodu v rovině Stokesova vektoru S_2

Pohyb v rovině Stokesova vektoru S_2 (viz 5.14) je na začátku mírně ovlivněn nejspíše neustálenou teplotou na senzorickém vlákně (do 140 s), to však není až tak podstatné, protože přiložení kádinky bylo ihned zaznamenáno. Průběh bodu byl trochu více chaotický než u předešlých měření.



Obr. 5.15: Znázornění stupně polarizace DOP

DOP má pravidelný průběh v rozmezí od 5 do 70 %. Lze u něj pozorovat postupné roztahování opakujících se intervalů.

5.3.2 Vynesení výsledků ze spektrálního analyzátoru



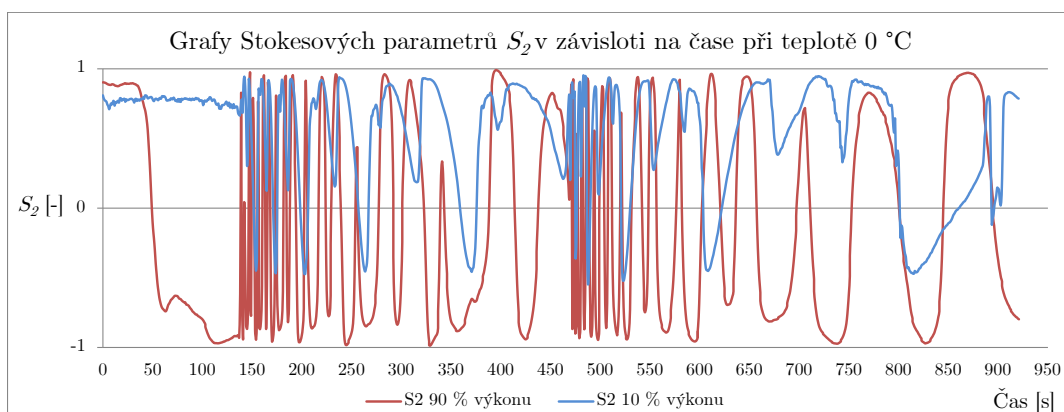
Obr. 5.16: Znázornění intenzity spektra

Graf získaný ze spektrálního analyzátoru ukázal, že vliv změny teploty senzorického vlákna má také vliv na změnu intenzity spektra měřené vlnové délky $\lambda = 635,1 \text{ nm}$. Z grafu lze vyčíst přiložení kádinky, kdy do této doby se intenzita pohybovala okolo 1000, poté však razantně vystoupala přes 6000. Průběh po přiložení je úzký a následně se s ustalováním teploty rozšiřuje. Při odebrání kádinky došlo opět k rychlým změnám a dalo by se říci, že spektrální analyzátor zaznamenává podobné změny jako polarimetr, jen v jiné závislosti.

6 DISKUSE NAD NAMĚŘENÝMI ÚDAJI

Kapitola se věnuje diskusi a srovnávání naměřených údajů jednotlivých měření. Z výsledků získaných na polarimetru bude dále zmiňován hlavně Stokesův vektor S_2 a DOP. Vektor S_2 bude sloužit jako jeden ze stěžejních parametrů pro srovnávání získaných průběhů. Důvodem výběru tohoto parametru je fakt, že sledovaný bod v Poincarého kouli se při změně teploty pohyboval nejvíce v rovině tohoto vektoru. Druhý důležitý parametr DOP, získaný z polarimetru je zde taktéž velmi důležitý, jak bude vidět dále.

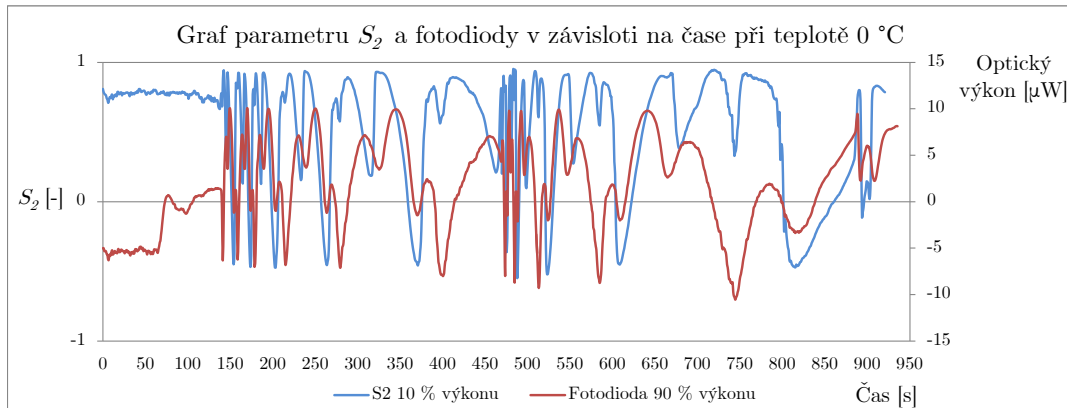
6.1 Stokesův vektor při 90 a 10 % výkonu



Obr. 6.1: Srovnání Stokesových vektorů S_2 při rozdílném výkonu z optické trasy

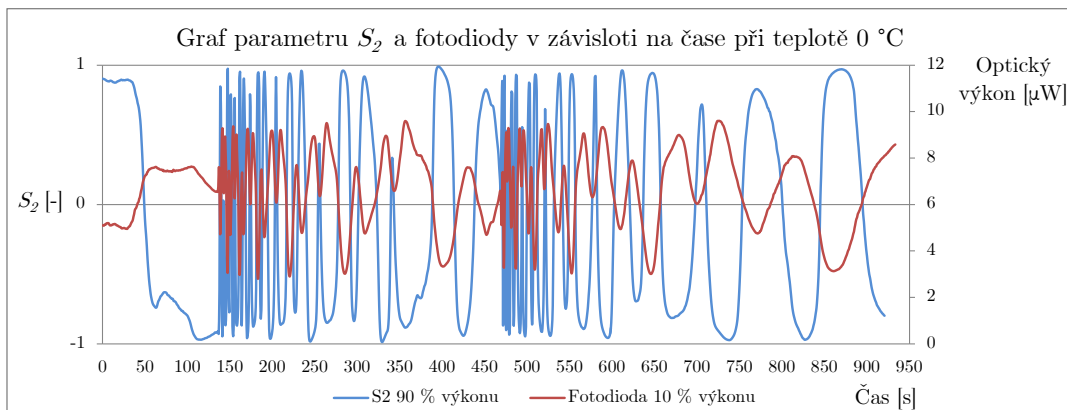
V zobrazeném grafu (viz 6.1) jsou zobrazeny Stokesovy vektory S_2 při rozdílných výkonech optické trasy přivedených na polarimetr. Obě provedená měření probíhaly za téměř totožných podmínek, ale lze pozorovat, že dodaný výkon 10 % z děliče výkonu zachovávajícího polarizaci v modrém průběhu grafu se znatelně podepsal na jeho výsledné charakteristice. Grafické závislosti jsou z rozdílných měření, ale jsou zde zmíněny pro zobrazení, jak moc optický výkon ovlivnil výsledek měření. Červený průběh vektoru S_2 je pravidelný, zaoblený a dotažený k hraničním bodům Poincarého koule v rozmezí -1 a 1. Z obou grafů však lze vyčíst přiložení (140 s) a odebrání kádinky (470 s) s ledovou tříští, kdy oba průběhy zaznamenaly velmi úzkou šířku signálu s rychlými změnami. A mezi těmito intervaly také lze pozorovat postupné roztážení signálu.

6.2 Stokesův vektor a výkon na fotodiodě



Obr. 6.2: Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem výkonu na fotodiodě

V přiloženém grafu srovnání vektoru S_2 a fotodiody (viz 6.2) jsou vidět překrývající se části u průběhu měření. Na začátku je možné vidět prakticky stejnou reakci obou výstupních zařízení na změnu teploty nad senzorickým vláknem. Dokonce šířka signálu je velmi podobná, jen u fotodiody se průběh zdá být dále o něco opožděnější. Při pozorování jednotlivých výběžků lze například v čase 320–325 s vidět podobný průběh obou grafů, kdy obě charakteristiky poklesly a poté následně začaly zase stoupat. V druhé polovině grafů po odebrání kádinky je možné sledovat, že fotodioda a vektor S_2 souhlasně vykreslují tři vrcholy v širším průběhu, pouze s jinou amplitudou.

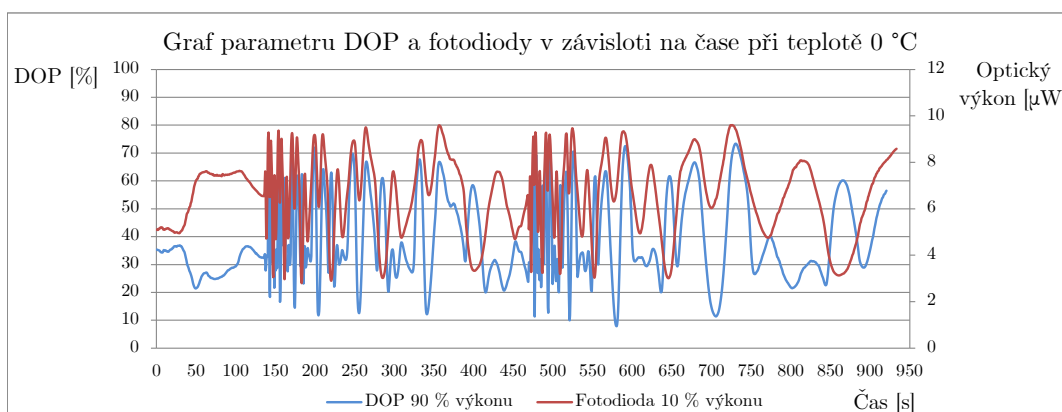


Obr. 6.3: Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem výkonu na fotodiodě

Druhý graf, kdy na fotodiodu bylo dodáno pouze 10 % výkonu z optické trasy se při srovnání se Stokesovým vektorem S_2 již tolik nepodobá. Na průběhu fotodiody je vidět, že dodaný výkon není až takovým problémem, protože fotodioda změny

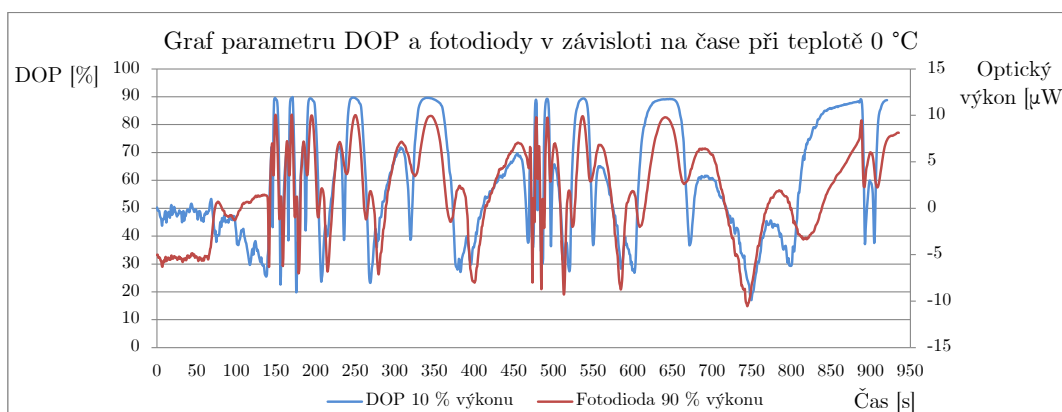
nad senzorkým vláknem zaznamenala. Na průběhu obou grafů lze vidět přiložení i odebrání, ale při bližším pohledu se jako největší zajímavost jeví to, že jednotlivé vrcholy mají stejnou šířku intervalu při ustalování teploty. Průběhy vrcholů jsou však jakoby navzájem obrácené.

6.3 Srovnání DOP a výkonu fotodiody



Obr. 6.4: Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na fotodiodě

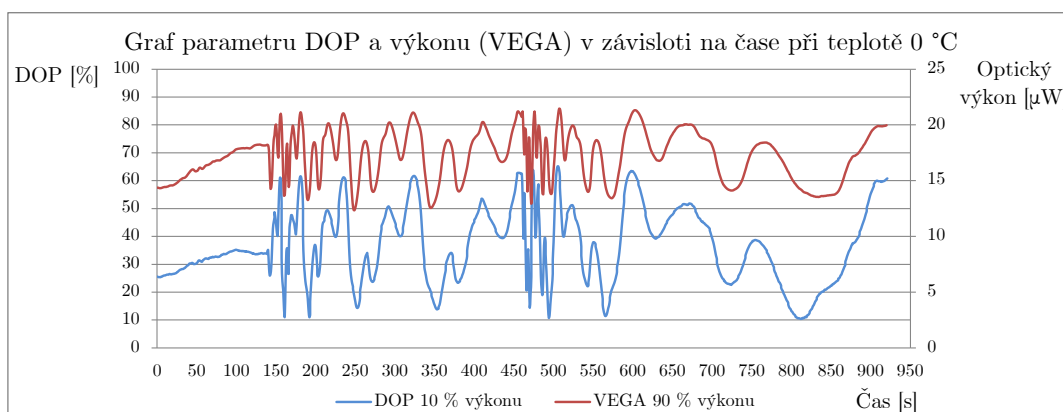
Velmi zajímavým srovnáním se zdají být průběhy stupně polarizace DOP a fotodiody. U průběhů lze pozorovat srovnatelné změny v oblastech 225 až 280 s, kdy dochází k vykreslování velmi podobného průběhu, vrcholy se nachází ve stejných časech, pouze mají jinou amplitudu. V podrobném pohledu na průběhy lze tyto intervaly dále nacházet v časech 325–385 s, 550–610 s a také v 660–750 s. V těchto intervalech dochází k postupnému roztahování průběhu a rozličně se mění amplituda.



Obr. 6.5: Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na fotodiodě

Největší shody průběhů u měření bylo dosaženo při dodaném výkonu 90 % na fotodiodu a 10 % na polarimetr. Ihned po přiložení oba vynesené průběhy prakticky kopírují své charakteristiky s lehkými vzájemnými odchylkami. Tento srovnávací graf je asi jedním z nejlepších dosažených výsledků provedeného měření a je v něm jasně vidět, že funkčnost fotodiody jako snímače změn na senzorickém vlákně byla dokázána.

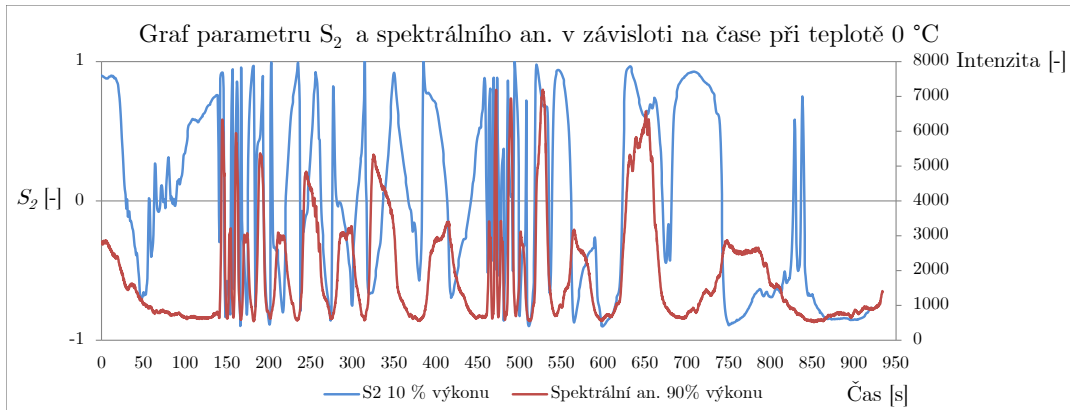
6.4 Srovnání DOP a výkonu na měřiči VEGA



Obr. 6.6: Srovnání parametru DOP s průběhem výkonu na měřiči VEGA

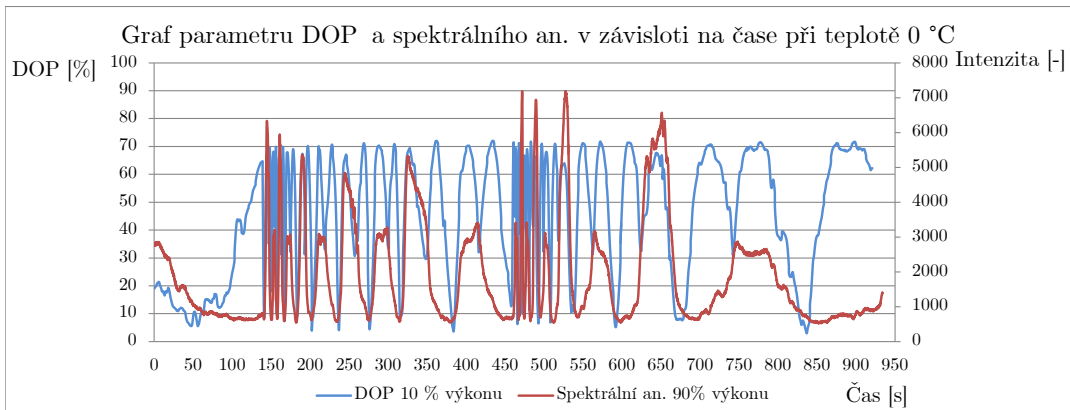
Měření na měřiči optického výkonu VEGA bylo provedeno pro další ověření funkčnosti zapojení optické trasy se senzorickým vlákнем. Výsledné grafické závislosti potvrzují, že trasa a měření na jednotlivých komponentech pracují podle očekávání. Grafy DOP a výkonu na měřiči VEGA mají shodné průběhy prakticky v celém cyklu měření.

6.5 Stokesův vektor a spektrální analyzátor



Obr. 6.7: Srovnání Stokesova vektoru S_2 s průběhem intenzity na spektrálním an.

V dalším grafu v diskusi je zobrazen Stokesův vektor S_2 a průběh změny intenzity spektra. Měření na spektrálním analyzátoru bylo prováděno na jedné vlnové délce $\lambda = 635,1 \text{ nm}$ a tímto měřením byla dokázána změna spektra se změnou teploty na sensorickém vlákně. Ve srovnání s vektorem S_2 lze pozorovat rychlejší změny spektra při přiložení a odebrání kádinky. V těchto intervalech taktéž docházelo k největšímu růstu intenzity. Poté, když se teplota ustalovala dochází u průběhu k menším roztažení průběhu, avšak není to tak zřetelné jako u měření na polarimetru. Průběhy se navzájem nepříliš kopírují, to však v tomto případě není důležité, jelikož důkaz o změně spektra je nevyvratitelný.



Obr. 6.8: Srovnání parametru DOP s průběhem intenzity na spektrálním an.

Posledním grafem pro srovnání je graf DOP a průběhu intenzity spektrálního analyzátoru. Porovnávané průběhy dosahují velké podobnosti po náhledu na jednotlivé intervaly průběhů. Po přiložení kádinky lze pozorovat stejnou šířku průběhů intervalů a také překrývání se ve stejných časech. Nejvíce zřetelné je to v první polovině grafu. Průběh intenzity na vlnové délce $\lambda = 635,1 \text{ nm}$ je tedy velmi důvěryhodný v porovnání s DOP.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na analýzu způsobu měření změn optického výkonu pomocí optického vláknového senzoru. Vláknový senzor zde zastával funkci senzoru teplotní změny, kdy byly sledovány průběhy nelineárních parametrů PM vlákna při změně teploty v jeho okolí. Při provedení dlouhodobého měření s dobou trvání 920 s bylo senzorické PM vlákno umístěné v teplotní komoře nejprve ponecháno v klidu a po přiložení (140 s), odebrání kádinky (470 s) s ledovou tříští (0 °C) byly sledovány změny polarizace a pohybu sledovaného bodu v Poincarého kouli zobrazeného v programu na PC. Pomocí schématického zapojení s polarimetrem na konci testované optické trasy byla nejprve ověřena funkčnost a možnost použití navržené měřicí trasy pro další použití.

Další částí byl návrh a provedení měření na méně finančně nákladné fotodiodě za použití polarizaci zachovávajícího děliče výkonu 90:10, kdy byl signál rozdělen na dva výstupní porty, z nichž jeden výstup byl měřen na fotodiodě a druhý na polarimetru. Polarimetr zde sloužil jako reference pro srovnání a ověření měření. Schématické zapojení s fotodiodou bylo doplněno o důležitý přípravek pro pootočení os o 45° a lineární polarizátor před fotodiodu. Měření byly získány významné grafické závislosti Stokesova vektoru S_2 , DOP a optického výkonu z fotodiody.

V šesté kapitole byly vybrány nejdůležitější charakteristiky získané ze všech provedených měření a následně byly porovnány a prodiskutovány. Při zkoumání jednotlivých charakteristik bylo dosaženo nejlepších výsledků při srovnání průběhů stupně polarizace DOP a Stokesova vektoru S_2 při 10 % výkonu z optické trasy na polarimetru s naměřeným výkonem na fotodiodě při 90 % výkonu z optické trasy. Po pohledu na zmíněné grafy je nutné dojít k závěru, že fotodioda efektivně a účelně prokazuje změny optického výkonu a stavu polarizace na výstupu optické trasy a je tedy vhodným zařízením pro měření polarizačních změn v optickém vlákne.

Práce se rovněž zabývala velmi přesným měřením vlnové délky při změně teploty. Toto měření bylo provedeno v prakticky totožném zapojení jako s fotodiodou. Výstup z jednoho portu byl vyveden opět na polarimetr a druhý port byl napojen přímo na spektrální analyzátor, nebylo však potřeba přípravku pro pootočení ani lineárního polarizátoru. Měření probíhalo na jedné vlnové délce $\lambda = 635,1$ nm a po nahlédnutí na získané charakteristiky je možné pozorovat změny spektra při přiložení a odebrání kádinky. Z toho je vyveden závěr, že změna teploty na senzorickém vlákne způsobuje změnu spektra a intenzity světla na výstupu optické trasy.

LITERATURA

- [1] COLLETT, Edward. *Field Guide to Polarization*. Vol. FG05. Bellingham, Washington USA: SPIE PRESS, 2005. ISBN 9780819458681.
- [2] COLLETT, Edward. *Polarized Light in fiber optics*. New Jersey: SPIE, 2003. ISBN 9780819457615.
- [3] LIETAERT, Gregory. *Testing Polarization Mode Dispersion in the Field* [online]. 2007 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://bit.ly/2AWfahC>.
- [4] *Wikipedia: Birefringence* [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Birefringence>.
- [5] *Gymnázium L. J. Jaroše: Polarizace světla* [online]. [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: <http://bit.ly/2iv65Y2>.
- [6] Polarizace světla. *WIKISKRIPTA* [online]. [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: <http://bit.ly/2z4iN7s>.
- [7] Degree of polarization. *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <http://bit.ly/2z4tV3l>.
- [8] KOLÁČKOVÁ, Aneta. *Optimalizace měření optického vlákna na výstupu vláknového senzoru teploty*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [9] *Fosco: What are polarization maintaining fibers?* [online]. [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <http://bit.ly/2hLiZ0U>.
- [10] ŠÍMÁK, Petr. *Využití polarizačních rovin šíření světla pro vysokorychlostní přenosy optickými vlákny*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [11] JEŘÁBEK, Vítězslav. *Optické přenosové součástky a systémy* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3403821/>.
- [12] ZHANG, Feng a John W.Y.LIT. *Temperature and Strain Sensitivity Measurements of High-Birefringent Polarization-Maintaining Fibers* [online]. Wilfrid Laurier University: Physics and Computer Science, 1993 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://bit.ly/2zNxqMc>.
- [13] JEON, Sang Min a Yong Pyung KIM. *Temperature measurements using fiber optic polarization interferometer* [online]. South Korea: Elsevier, 2004 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2hGdC2y>

- [14] Measuring Power in Fiber Optics. *FOA: Guide To Fiber Optics & Premises Cabling* [online]. The Fiber Optic Association [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://bit.ly/2zkK70F>.
- [15] *Thorlabs* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/index.cfm>.
- [16] *Ocean Optics: HR2000+ Data Sheet* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://bit.ly/2zxEvy2>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

\vec{B}	vektor magnetického pole – vector of magnetic field
DGD	rozdílné skupinové zpoždění – Differential Group Delay
DOP	stupeň polarizace – Degree of Polarization
DPS	degenerované polarizační stavy – Degenerate Polarization States
DSP	číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing
\vec{E}	vektor elektrického pole – vector of electric field
E_{0x}	maximální amplituda ve směru x – maximum amplitude in the x direction
E_{0y}	maximální amplituda ve směru y – maximum amplitude in the y direction
$E_x(z, t)$	x součást optického pole – x component of the optical field
$E_y(z, t)$	y součást optického pole – y component of the optical field
I_{pol}	intenzita polarizovaného světla – intensity of polarized light
I_{cel}	celková intenzita světla – total light intensity
L+45P	lineárně +45° polarizované světlo – linearly +45 polarized light
L-45P	lineárně -45° polarizované světlo – linearly -45 polarized light
LCP	levé kruhově polarizované světlo – left circularly polarized light
LHP	lineárně horizontální polarizované světlo – linearly horizontal polarized light
LVP	lineárně vertikální polarizované světlo – linearly vertical polarized light
n	index lomu – refractive index
PM	vlákno zachovávající polarizaci – Polarization-Maintaining Fiber
PSP	hlavní stavy polarizace – Principal State of Polarization
RCP	pravé kruhově polarizované světlo – right circularly polarized light
α	pomocný úhel – auxiliary angle
α_B	Brewsterův úhel – Brewster's angle
S_0	první Stokesův parametr – first Stokes parameter
S_1	druhý Stokesův parametr – second Stokes parameter
S_2	třetí Stokesův parametr – third Stokes parameter
S_3	čtvrtý Stokesův parametr – fourth Stokes parameter
x, y, z	Kartézský souřadnicový systém – Cartesian coordinate system
2α	koordinace v pozorovatelné polarizační kouli – coordinate on the observable polarization sphere
2ψ	koordinační úhel v Poincarého kouli – coordinate angle on the Poincare sphere
2χ	koordinační úhel v Poincarého kouli – coordinate angle on the Poincare sphere

δ	fázový rozdíl – phase difference
δ_x	fáze vlny (x) – phase of the wave (x)
δ_y	fáze vlny (y) – phase of the wave (y)
ψ	sférický úhel orientace – spherical angle of orientation
χ	úhel elipticity – angle of ellipticity

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého DVD

66

A OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Přiložené DVD obsahuje všechny důležité soubory diplomové práce. Lze zde nalézt elektronickou verzi diplomové práce ve formátu PDF, která se nachází ve složce Diplomová práce. Obsaženy jsou zde složky se soubory ze všech provedených měření: Měření polarimetr, Měření spektra, Měření fotodioda, Měření VEGA a Srovnávací grafy.